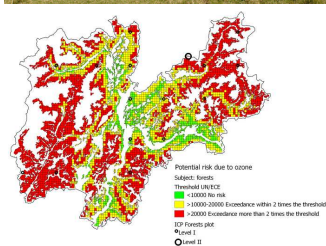


# OSONO TROPOSFERICO IN PROVINCIA DI TRENTO

Livelli ed effetti  
sulla vegetazione



***Relazione attività 2009***

# **OZONO TROPOSFERICO IN PROVINCIA DI TRENTO**

**Livelli ed effetti  
sulla vegetazione**

*Relazione attività 2009*

**Elena Gottardini, Fabiana Cristofolini, Antonella Cristofori**

*Fondazione Edmund Mach*

*Via E. Mach 1, 38010 San Michele all'Adige (Trento)*

**Marco Ferretti, Giovanni Bacaro, Francesco Geri**

*TerraData environmetrics*

*Via P.A. Mattioli 4, 53100 Siena*

Relazione relativa allo studio realizzato nel 2009 nell'ambito della convenzione stipulata tra la Fondazione Edmund Mach - Istituto Agrario di S. Michele a/A (FEM) e:

- Servizio Foreste e Fauna della Provincia Autonoma di Trento (Det. N. 473/2009 del 10/12/2009);
- Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente di Trento (Convenzione N. 44/2009 del 11/01/2010).



## Nota

Questa relazione descrive l'attività svolta nel 2009 dalla Fondazione Edmund Mach – Istituto Agrario di San Michele all'Adige (FEM) in stretta collaborazione con *TerraData environmetrics* e pertanto in alcuni casi il contributo di ciascuno diventa difficilmente separabile.

### *Forma raccomandata di citazione:*

Gottardini E., Cristofolini F., Cristofori A., Ferretti M., Bacaro G., Geri F., 2010. Ozono troposferico in provincia di Trento: livelli ed effetti sulla vegetazione nel 2009. Relazione tecnica dello studio realizzato nel 2009 nell'ambito delle convenzioni stipulate dalla Fondazione Edmund Mach con il Servizio Foreste e Fauna e con l'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente della Provincia Autonoma di Trento. 56 pp.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano le organizzazioni e le persone che a vario titolo hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro.

Tra le istituzioni:

- il Servizio Foreste e Fauna della Provincia Autonoma di Trento (PAT) per il contributo economico;
- l'Agenzia Protezione Ambiente della Provincia di Trento (APPA TN) per il contributo economico.

Tra le persone:

- Mauro Confalonieri (Servizio Foreste e Fauna, PAT) per il sostegno al lavoro e la collaborazione organizzativa;
- il personale delle Stazioni Forestali della Provincia per il prezioso contributo nell'installazione delle stazioni di monitoraggio dell'ozono presso i siti di Livello I e la puntuale sostituzione settimanale dei campionatori passivi;
- Maria Cristina Viola per il prezioso aiuto in campo e nella validazione microscopica dei sintomi fogliari.

Ringraziamo inoltre Giacomo Gerosa (Ecometrics srl) per la stima di AOT40 e Wolfgang Loibl (AIT Austrian Institute of Technology GmbH) per le utili indicazioni operative.



<b>Riassunto .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Introduzione .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Materiali e metodi .....</b>	<b>7</b>
2.1 Misure delle concentrazioni di ozono .....	7
2.2 Rilievo dei sintomi visibili .....	8
2.2.1 Selezione dei siti di Livello I .....	9
2.2.2 Individuazione delle aree di campionamento .....	9
2.2.3 Rilevamento dei sintomi da ozono sulla vegetazione .....	12
2.2.4 Osservazioni sulla specie <i>O<sub>3</sub>-sensibile Viburnum lantana L.</i> .....	12
2.2.5 Validazione microscopica .....	16
2.3 Analisi dei dati .....	17
2.3.1 Verifica delle misurazioni ottenute dai dosimetri passivi .....	17
2.3.2 Stima di AOT40 .....	17
2.3.3 Modellistica .....	17
2.3.4 Analisi di rischio potenziale .....	25
<b>3. Risultati .....</b>	<b>29</b>
3.1 Ozono in Trentino .....	29
3.1.1 Concentrazioni ed esposizione .....	29
3.1.2 Modellizzazione e spazializzazione .....	35
3.1.3 Rischio potenziale .....	46
3.2 Sintomi fogliari visibili .....	50
3.2.1 Osservazioni sui siti forestali di Livello I .....	50
3.2.2 Osservazioni sul sito forestale di Livello II di Passo Lavazé .....	51
3.2.3 Osservazioni su Viburno .....	52
<b>4. Conclusioni .....</b>	<b>54</b>
<b>5. Bibliografia .....</b>	<b>55</b>

## Riassunto

*Lo studio intrapreso a partire dal 2007 sui livelli dell'ozono troposferico in Trentino e sui suoi effetti in termini di sintomi sulla vegetazione è proseguito anche nel 2009. Il progetto è realizzato dal Centro Ricerca ed Innovazione della Fondazione Edmund Mach in collaborazione con TerraData environmetrics (Spin-off dell'Università di Siena) nell'ambito di una co-operazione con l'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente di Trento e il Servizio Foreste e Fauna della PAT.*

*Le misure di ozono troposferico, effettuate su una rete di 20 siti forestali distribuiti sistematicamente sul territorio provinciale, hanno confermato anche per il 2009 la presenza di concentrazioni di ozono piuttosto elevate, tali da portare al frequente superamento dei valori di rischio potenziale per la vegetazione stabiliti dalla Direttiva 2008/50/CE dell'Unione Europea e dai livelli critici indicati dalla Commissione Economica per l'Europa delle Nazioni Unite (UN/ECE).*

*Attraverso modelli geostatistici è stato possibile stimare le concentrazioni di ozono su tutto il territorio provinciale. Misurazioni ed elaborazioni confermano come le aree remote a quote superiori ai 500 m s.l.m. siano interessate da concentrazioni elevate di ozono. Mediante successive applicazioni GIS, è stato possibile mappare le aree forestali ed agrarie a potenziale rischio ozono. Da una valutazione conservativa, emerge che, se si considerano i valori obiettivo per il 2010 della Direttiva europea (9000 ppb h), circa il 10% della superficie forestale trentina risulta esposta a valori di ozono potenzialmente dannosi; questa percentuale sale al 57% ed all'83% se invece si considerano rispettivamente i livelli critici UN/ECE (5000 ppb h) e la soglia di rischio stabilita dall'Unione Europea come obiettivo di lungo termine per la protezione della vegetazione (3000 ppb h).*

*A fronte di questi dati, occorre tuttavia notare che le osservazioni svolte in campo hanno evidenziato l'effettiva presenza di sintomi fogliari visibili attribuibili all'ozono solo su *Viburnum lantana* L., specie oggetto di uno studio specifico. Tali sintomi non sono invece stati riscontrati su nessuna delle specie osservate presso i siti forestali di Livello I e II.*

# 1. Introduzione

Dal 2007 la Fondazione Edmund Mach, in collaborazione con TerraData environmetrics (*Spin-off* dell'Università di Siena) ha avviato uno studio sui livelli dell'ozono troposferico nelle aree rurali e forestali della provincia di Trento con l'obiettivo di comprendere i rischi potenziali per la vegetazione connessi a tale inquinante ritenuto altamente fitotossico. A tale scopo sono stati utilizzati dei campionatori passivi per misurare le concentrazioni di ozono nei siti forestali di monitoraggio appartenenti alla rete UE-UN/ECE di Livello I (Gottardini et al., 2008 e 2009). I dati così raccolti hanno permesso di sviluppare una prima mappatura delle concentrazioni e dell'esposizione in termini di AOT40 (Bacaro et al., 2008).

Da questi primi risultati era emersa l'opportunità di integrare la rete di misura dell'ozono con altri punti nell'ottica di migliorare la qualità delle stime a livello provinciale. Perciò nel 2009 alla rete di Livello I sono stati aggiunti 5 nuovi siti di misura che hanno consentito di ottenere dati sulle concentrazioni di ozono con una migliore distribuzione territoriale.

Oltre ad ottenere informazioni sulle effettive concentrazioni di ozono nelle aree forestali della provincia e stime di rischio per la vegetazione, lo studio ha per obiettivo anche quello di verificare in campo la presenza di effetti sulla vegetazione attribuibili a questo inquinante. Per rispondere a questa esigenza sono state effettuate una serie di osservazioni circa la presenza di sintomi fogliari visibili, nel 2007 sulla cultivar di tabacco Bel-W3 nota per la sua sensibilità all'ozono e, nel 2008 e 2009, sulla vegetazione spontanea, in particolare sulle specie arboree ed arbustive presenti in alcuni siti di misura dell'ozono. Nel 2009 è stato avviato anche uno studio con lo scopo di verificare se la specie arbustiva *Viburnum lantana* L. può essere considerata un affidabile bioindicatore<sup>a</sup> dell'O<sub>3</sub> troposferico. Data la nota sensibilità di *Viburnum lantana* all'ozono (Skelly et al., 1998; VanderHeyden et al., 2001; Bussotti et al., 2005; Novak et al., 2008) e la specificità della risposta in termini di sintomi fogliari visibili, resta da stabilire se esiste una relazione dose/risposta. Lo studio intrapreso mira a verificare l'esistenza di questa condizione, essenziale affinché questa specie possa essere utilizzata come bioindicatore.

---

<sup>a</sup> I bioindicatori sono organismi sensibili nei confronti di uno stress (inquinante) e rispondono alla sua presenza in maniera chiara, non ambigua; è inoltre identificabile una relazione tra causa ed effetto, ovvero tra dose di inquinante ed intensità della risposta dell'indicatore.

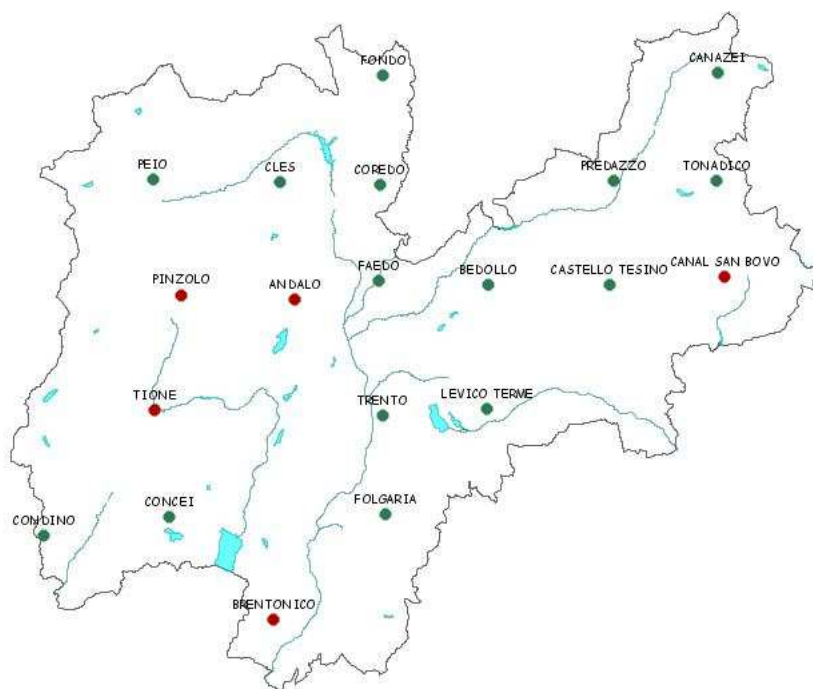
Esistono già bioindicatori specifici per studiare gli effetti dell'ozono sulla vegetazione quali la cultivar di tabacco supersensibile BelW3 - già utilizzata in Trentino per uno studio preliminare effettuato nel 2007 (Gottardini et al., 2007) - il trifoglio, la centaurea e cloni di pioppo. In tutti questi casi le piante vengono coltivate in condizioni standard e poi esposte all'aria ambiente che si vuole monitorare (biomonitoraggio attivo). L'indicatore di risposta più frequentemente indagato è il sintomo fogliare (es. tabacco); in altri casi si considera anche la biomassa (es. trifoglio).

Rispetto al biomonitoraggio attivo, l'utilizzo di specie native presenta dei vantaggi quali la possibilità di stimare gli effetti dell'O<sub>3</sub> in aree forestali-remote, dove la gestione ed il mantenimento di bioindicatori esposti attivamente risulterebbe difficoltoso; inoltre le piante sono già adattate all'ambiente e quindi non risentono dello stress dovuto al trapianto e/o alle variazioni delle condizioni ambientali.

## 2. Materiali e metodi

### 2.1 Misure delle concentrazioni di ozono

Le concentrazioni di ozono sono state rilevate presso i 15 punti della rete UE-UN/ECE per il rilevamento delle condizioni dei boschi che ricadono sul territorio provinciale (densità nominale: 1 punto ogni 225 km<sup>2</sup>, corrispondente ad una rete di circa 15\*15 km), già oggetto di rilievo nelle campagne 2007 e 2008; nella stagione 2009 le misure sono state inoltre estese ad altri 5 siti forestali, allo scopo di rendere più uniforme la copertura del territorio provinciale (Figura 1).



*Figura 1. Area di studio e dislocazione dei siti di misura dell'O<sub>3</sub>. In rosso i 5 siti forestali aggiunti nella campagna di rilievo 2009.*

In ogni sito forestale, all'interno di un'area aperta selezionata per avere una sufficiente circolazione di aria (diametro maggiore del doppio dell'altezza dell'ostacolo più prossimo), sono stati esposti i campionatori passivi per l'ozono, sostituiti a cadenza settimanale (PASSAM AG – per dettagli vedi <http://www.passam.ch/>). I campionatori passivi per la misura dell'ozono sono costituiti da fiale in polipropilene con un filtro in fibra di vetro imbevuto con soluzione di acido acetico e 1,2-di(4-piridil)-etilene, che reagisce con l'ozono entrato nel campionatore per diffusione. La reazione comporta la formazione di un'aldeide, la cui determinazione quantitativa mediante spettrofotometria (a 442 nm) consente di risalire alla concentrazione media oraria settimanale di ozono.

La Tabella 1 riassume le informazioni relative a codice CEE, comune, localizzazione geografica, stazione forestale di riferimento e quota associate a ciascun sito di campionamento. Le misure di ozono sono state raccolte nel periodo tra il 6 maggio e il 2 settembre 2009; le elaborazioni successive sono state svolte stabilendo un periodo di riferimento, dal 20 maggio al 19 agosto 2009, selezionato in base alla disponibilità dei dati raccolti nella maggioranza delle stazioni.

*Tabella 1. Sintesi delle informazioni relative ai siti di campionamento ozono 2009.*

*Coordinate in Gauss-Boaga, datum Roma40.*

N. CEE	Comune	Stazione Forestale	Quota (m slm)	x	y
49	Fondo	Fondo	1375	1665949	5148025
52	Canazei	Pozza di Fassa	1588	1713980	5148362
71	Peio	Ossana	1675	1632826	5133037
72	Cles	Cles	1698	1651186	5132648
73	Coredo	Coredo	1389	1665450	5132359
75	Predazzo	Predazzo	1464	1699060	5132798
76	Tonadico	Dem. Paneveggio	1854	1713788	5132795
99	Faedo	Ala	306	1665324	5118424
100	Bedollo	Baselga di Piné	1400	1680976	5117859
101	Castello Tesino	Caoria	1549	1698517	5117954
127	Trento	TN-Lavori	359	1665808	5099179
128	Levico Terme	Levico terme	1105	1680918	5100063
157	Condino	Condino	1856	1617253	5081830
158	Concei	Tiarno di Sotto	1309	1635204	5084579
160	Folgaria	Folgaria	1210	1666290	5084879
	Brentonico	Mori	1464	1650217	5069802
	Canal San Bovo	Canal San Bovo	1503	1715044	5119100
	Pinzolo	Pinzolo	971	1636967	5116462
	Tione	Tione	719	1633074	5099886
	Andalo	Andalo	1563	1653255	5115751

## **2.2 Rilievo dei sintomi visibili**

Nel corso della stagione vegetativa 2009 sono stati effettuati rilievi dei sintomi fogliari presso i seguenti siti:

- sei siti di Livello I: Bedollo, Castello Tesino, Pejo, Tonadico, Condino e Concei; i rilievi sono stati condotti a settembre;
- il sito di Livello II di Passo Lavazè; i rilievi sono stati condotti il 24 agosto.

### 2.2.1 Selezione dei siti di Livello I

I siti monitorati nel 2009 sono stati gli stessi dell'anno precedente. La selezione dei sei siti di Livello I era stata basata sui risultati delle misure di ozono effettuate con campionatori passivi nel corso del 2007 ed, in particolare, era stato utilizzato l'indice di esposizione AOT40. Erano stati scelti i 3 siti che mostravano i valori più elevati di AOT40 ed i 3 con valori inferiori al livello critico di 5000 ppb\*h ( $=10000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ ) stabilito da UN/ECE per la protezione della vegetazione e che presentavano la minor differenza di quota rispetto ai precedenti (*range* di quota: 1300 -1800 m s.l.m.). In termini di concentrazione di ozono, i tre siti ad alto AOT40 presentavano valori medi  $>120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; i tre siti a basso AOT40 presentavano valori medi  $<100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

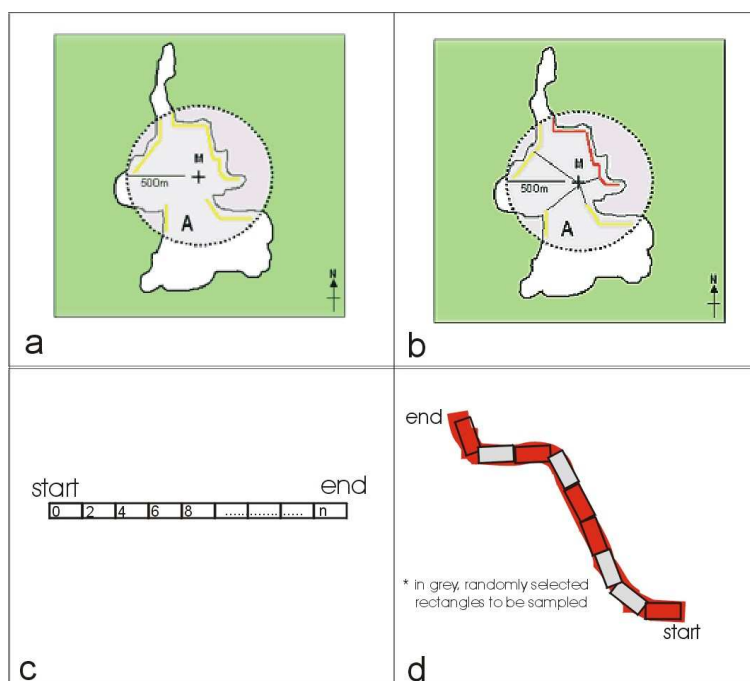
### 2.2.2 Individuazione delle aree di campionamento

Come previsto dalla metodica ICP Forests (Submanual for the Assessment of Ozone Injury on European Forest Ecosystems - Intensive Monitoring Plots Level II - <http://www.ozoneinjury.org/>, il rilievo dei sintomi da ozono sulla vegetazione viene effettuato lungo il margine della radura dove è collocato il campionatore passivo. La selezione del sito di installazione del campionatore passivo, avvenuta nel 2007, aveva già tenuto in considerazione l'esigenza di trovarsi in una situazione sufficientemente aperta, tale che la dimensione minore della radura fosse almeno pari al doppio dell'altezza degli alberi circostanti.

I rilievi non avvengono lungo tutto il margine forestale della radura, ma su una porzione la cui dimensione è dipendente dalla lunghezza del margine stesso. L'area da campionare è costituita da rettangoli (miniplot) delle dimensioni di 1 x 2 m ciascuno. La procedura per l'individuazione dei miniplot è la seguente (Figura 2):

- i. si identifica un'area di raggio 500 m centrata sul sito di misura dell'ozono;
- ii. all'interno dell'area si identificano i margini di foresta esposti alla luce più lunghi di 10 m;
- iii. tra quelli identificati, si sceglie il margine di foresta che contiene il punto più vicino al sito di misura dell'ozono (= LESS: Light Exposed Sampling Sites);
- iv. si misura la lunghezza del margine selezionato e si identifica un'area ampia 1 m; si ottiene così un transetto largo 1 m e lungo x ( $x$  = lunghezza del margine di foresta selezionato);
- v. riferendosi alla tabella 2, si stabilisce il numero n di miniplot, che dipende dalla lunghezza del margine forestale e dal livello di precisione prescelto (10% o 20%); (ad es. per  $x = 30$  m, il numero di miniplot con errore del 20% è  $n = 9$ );

- vi. si numerano tutti i possibili rettangoli 1 x 2 m non sovrapposti in cui risulta suddiviso x, assegnando loro il codice 0, 2, 4, 6, 8, 10..., x-2 a partire dall'estremità di sinistra e procedendo in senso orario;
- vii. per ogni LESS si selezionano in modo casuale n codici (= numero di miniplot da campionare).



*Figura 2. a: individuazione dell'area di raggio 500m e dei margini forestali in essa compresi; b: individuazione del LESS; c: identificazione e numerazione dei rettangoli in cui il LESS risulta suddiviso; d: selezione casuale degli n miniplot da campionare all'interno del LESS (Tratto da "Submanual for the Assessment of Ozone Injury on European Forest Ecosystems").*



Tabella 2. Dimensione del campione ad un definito livello di precisione, per differenti lunghezze del margine di foresta selezionato (Elaborato da "Submanual for the Assessment of Ozone Injury on European Forest Ecosystems").

Lunghezza del margine di foresta esposto alla luce (m) LESS	Possibili rettangoli 2x1 m non sovrapposti	Dimensione del campione (=N. miniplot) errore 10%	Dimensione del campione (=N. miniplot) errore 20%
10	5	5	4
15	8	7	6
20	10	9	7
25	13	11	8
30	15	13	9
35	18	15	10
40	20	17	11
45	23	18	12
50	25	20	12
60	30	23	13
70	35	26	14
80	40	28	15
90	45	31	16
100	50	33	16
150	75	42	18
200	100	49	19
250	125	54	20
300	150	59	21
350	175	62	21
400	200	65	21
450	225	67	22
500	250	69	22
600	300	73	22
700	350	75	22
800	400	77	23
900	450	79	23
1000	500	81	23
2000	1000	88	23

La procedura standard per l'individuazione dei LESS è stata rigorosamente applicata al sito di Passo Lavazè (Figura 3). Per quanto riguarda i sei siti di Livello I, è stata adottata una procedura semplificata, considerando un margine forestale pari a 200 m e definendo *a priori* il numero di miniplot  $n = 10$ .

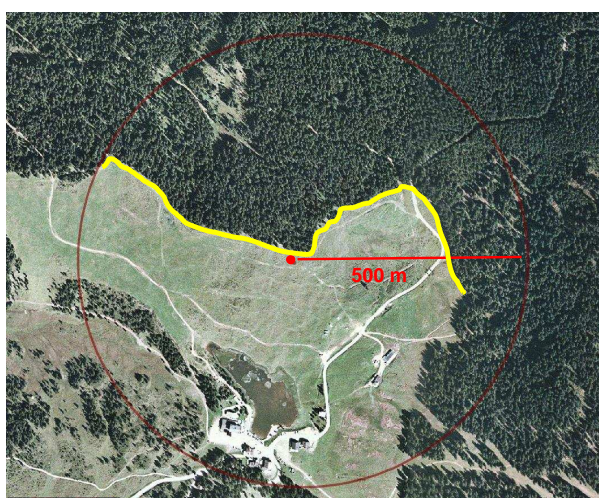


Figura 3. Individuazione del LESS presso il sito di Passo Lavazè.



### 2.2.3 Rilevamento dei sintomi da ozono sulla vegetazione

Una volta definiti i codici dei miniplot, si procede alla loro installazione che consiste nel delimitare i rettangoli individuati 1 x 2 m, posizionandoli con il lato maggiore lungo il margine forestale, e con il vertice in alto a sinistra in corrispondenza del metro selezionato. Per ogni miniplot è stata compilata la lista delle specie legnose che ricadevano completamente o in parte nel miniplot (es. rami di piante radicate all'esterno) sino ad un'altezza di 1.80 m da terra.

I sintomi attribuibili all'ozono si possono presentare come:

- piccoli punti rossicci, gialli o neri (*stipples*) omogeneamente distribuiti sulla superficie superiore della foglia;
- decolorazione omogenea, arrossamento o bronzatura generale della superficie superiore della foglia;
- aree clorotiche a bordi indefiniti, di colore giallo o verde chiaro (*chlorotic mottling*), sugli aghi delle conifere.

I sintomi da ozono interessano generalmente solo la superficie superiore della lamina fogliare delle latifoglie, si distribuiscono omogeneamente e non coinvolgono mai le venature. I sintomi appaiono prima sulle foglie più vecchie, esposte alla luce, mentre non colpiscono le zone ombreggiate della foglia (*shade effect*) e le foglie giovani.

Il rilevamento dei sintomi è stato effettuato con l'ausilio di una lente d'ingrandimento 10X, seguendo i criteri suggeriti nel manuale dell'ICP-Forests che fornisce un diagramma di flusso per ottimizzare la diagnosi dei danni da ozono. La presenza di sintomi attribuibili ad altre cause, biotiche od abiotiche, è sempre stata considerata e indicata nelle schede di rilievo. Per assicurare la qualità del rilievo sono state inoltre utilizzate guide di campo, per confrontare i sintomi osservati con il materiale iconografico di riferimento (Innes et al., 2001).

Ad ogni specie è stato assegnato un codice da 0 a 4 secondo la tabella 3. Il codice 4 è stato utilizzato per classificare piante che presentavano sintomi non chiaramente attribuibili né all'ozono né ad altri agenti noti quali funghi e/o insetti.

### 2.2.4 Osservazioni sulla specie *O<sub>3</sub>-sensibile Viburnum lantana L.*

*Viburnum lantana L.* è una specie arbustiva spontanea diffusa in boschi caducifogli, dalle Alpi fino alla Campania, con distribuzione altitudinale che va dalla fascia collinare a quella sub-alpina. Questa specie, nota per la sua sensibilità all'ozono, reagisce all'esposizione a questo inquinante manifestando sintomi fogliari specifici rappresentati da punteggiature (*stipples*) bruno-scure,

presenti sulla pagina superiore della foglia negli spazi internervali (Figura 4); i sintomi compaiono dapprima sulle foglie più vecchie che quindi sono state esposte all'aria per maggior tempo.



Figura 4. Tipici sintomi da ozono su foglia di *Viburnum lantana*.

Lo studio è stato realizzato in due aree del Trentino con diversi livelli di ozono. La selezione delle aree sperimentali è stata effettuata secondo la procedura di seguito descritta.

#### 2.2.4.1 Disegno sperimentale

In un precedente lavoro realizzato al fine di valutare gli effetti dell'ozono troposferico sulla vegetazione sensibile (Gottardini *et al.*, 2007) erano state effettuate misure delle concentrazioni di ozono in sei celle delle dimensioni di 1 x 1 km, tre delle quali selezionate casualmente tra 16 celle considerate a basso ozono e altre tre tra quelle ad alto ozono (rispettivamente con valori  $< 77.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $> 110.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>b</sup>) (Figura 5).

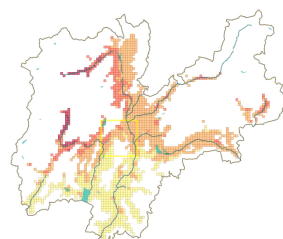
---

<sup>b</sup> Valori stimati medi di ozono del periodo maggio – luglio forniti dal modello elaborato da Techne (2006), riferiti alle celle presenti al di sotto dei 1000 m s.l.m. e comprese in un quadrato arbitrariamente scelto delle dimensioni di 15 x 15 km. Dei i valori medi di ozono predetti dal modello relativi alle 154 celle presenti nell'area di studio sono stati calcolati il 10° e il 90° percentile, risultati rispettivamente:

10° percentile =  $77.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$

90° percentile =  $110.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Questi valori sono stati assunti come limiti per definire le celle a basso (quelle inferiori al 10° percentile) ed alto (quelle superiori al 90° percentile) livello di ozono.



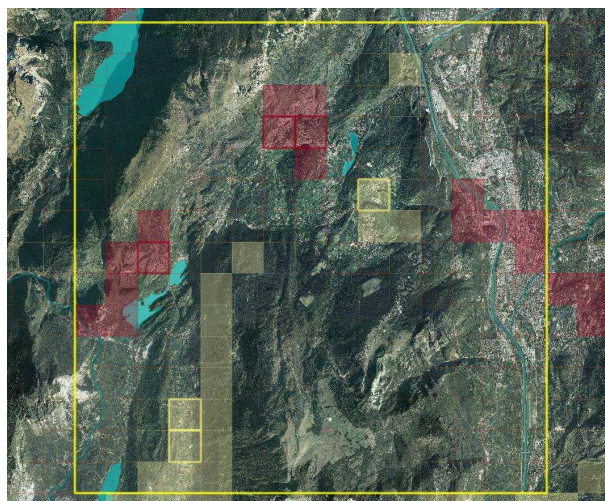


Figura 5. Area di studio con celle ad alto (rosso) e basso (giallo) livello stimato di  $O_3$ ; le celle con il bordo evidenziato sono quelle selezionate casualmente per lo studio sulla vegetazione sensibile e dove sono state effettuate le misure delle concentrazioni di ozono.

I dati di concentrazioni di ozono misurati con i campionatori passivi erano stati utilizzati per stimare i valori di AOT40 delle sei celle oggetto di studio (Figura 6).

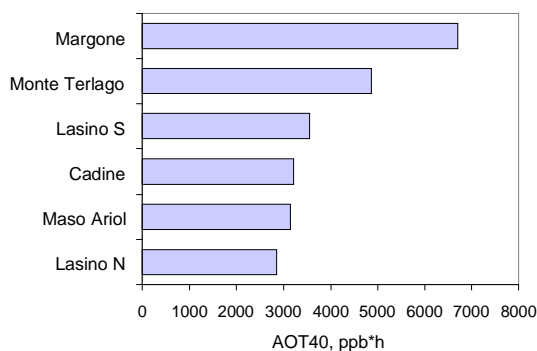


Figura 6. Stime di AOT40 calcolato su base statistica a partire dal dato medio di ozono rilevato tramite campionatori passivi nei 6 siti di studio.

Facendo riferimento a questi risultati, le due celle di 1 x 1 km con i valori di AOT40 estremi sono state selezionate per realizzare lo studio su *Viburnum lantana*, considerando dunque Margone come sito ad “alto ozono” e Lasino N (di seguito chiamato solo Lasino) come sito a “basso ozono”.

In queste due celle sono state individuate tutte le aree aperte disponibili<sup>c</sup> e lungo il margine di ciascuna area aperta è stato censito il numero totale N di piante di *Viburnum lantana* presenti. Sono dunque state tenute in considerazione solo le aree nelle quali  $N \geq 10$  e tra queste ne sono

<sup>c</sup> Per area aperta è stata considerata ogni area la cui ampiezza minima era uguale o maggiore all'altezza dell'ostacolo più prossimo.

state selezionate 3 casualmente (Figura 7). Per ciascuna delle tre aree aperte sono state selezionate casualmente  $n$  piante dove  $n = N/100 \cdot 20$ ; se  $n < 10$ , il numero di piante considerate è stato arrotondato per eccesso a 10 (Tabella 3).

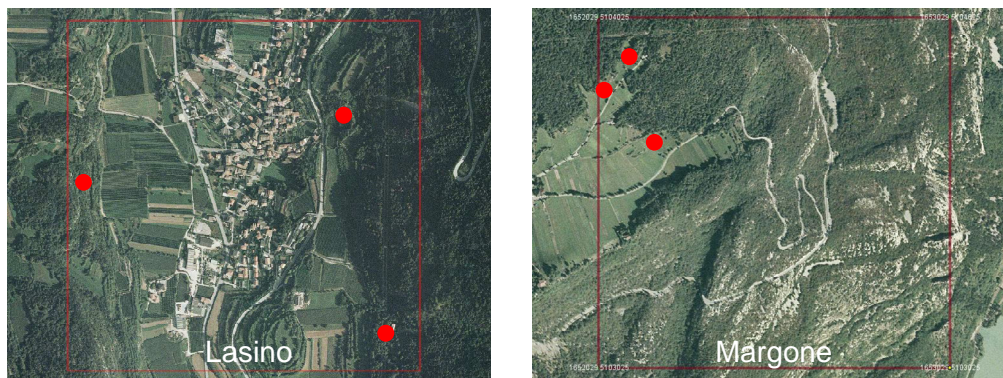


Figura 7. Aree di studio 1 x 1 km e individuazione delle aree aperte (punti rossi).

Tabella 3. Aree aperte selezionate per ogni località (= cella 1 x 1 km), numero di piante totali presenti lungo il margine di ciascuna area aperta e numero di piante osservate.

Località	Codice area aperta	N. piante totali	N. piante osservate
Lasino	L1	11	10
	L6	30	10
	L18	10	10
Margone	M3	77	16
	M7	32	10
	M8	59	12
TOTALE		219	68

#### 2.2.4.2 Rilievi in campo

I rilievi in campo sono stati svolti per 22 settimane consecutive, dal 6 maggio al 30 settembre 2009. In ciascuna delle 6 aree aperte sono stati rilevati i seguenti parametri:

- temperatura e umidità relativa utilizzando dei sensori *Tinytag Ultra* (Gemini Data Loggers Ltd., Chichester, UK) programmati per rilevare un dato per parametro ogni 15 minuti;
- concentrazioni medie settimanali di  $O_3$  utilizzando campionatori passivi (PASSAM AG); in ogni area aperta sono stati utilizzati due campionatori passivi co-locati all'interno dello stesso espositore;
- numero di piante sintomatiche; il rilievo è stato effettuato ogni due settimane, utilizzando una lente di ingrandimento 10x per l'osservazione delle foglie. Sono stati identificati come



tipici sintomi fogliari attribuibili all'ozono le punteggiature (*stipples*) bruno-scure, internervali, presenti sulla superficie adassiale (superiore) della foglia, secondo quanto definito nel protocollo del *Working Group on Air Quality* (2008) e riferendosi alla guida fotografica di Innes et al. (2001).

### 2.2.5 Validazione microscopica

I sintomi fogliari visibili indotti dall'ozono sono stati validati mediante osservazioni microscopiche seguendo la metodica indicata da vari Autori (Vollenweider et al., 2003; Günthardt-Goerg and Vollenweider, 2007). La tipica presenza di cellule del tessuto a palizzata collassate a causa del danno subito dall'ozono è stata verificata realizzando delle sezioni sottili di foglia (50  $\mu\text{m}$ ) ed effettuando osservazioni al microscopio ottico ad ingrandimento 400X (Figura 8).



Figura 8. Pianta di *Viburnum lantana* con sintomi da ozono sulle foglie più sviluppate e sezione di foglia - vista al microscopio ottico- fatta in corrispondenza di una lesione da ozono. Si riconosce lo strato del tessuto a palizzata con presenza di cellule collassate (marrone).

## **2.3 Analisi dei dati**

### *2.3.1 Verifica delle misurazioni ottenute dai dosimetri passivi*

Al fine di verificare l'affidabilità dei dati, le concentrazioni misurate mediante dosimetri passivi (20 siti rurali e forestali) sono state comparate con le misure condotte dalle centraline automatiche APPA (4 siti urbani ed 1 forestale). L'assunto di tale verifica è duplice: (i) i dati dalle centraline rappresentano il riferimento corretto; (ii) le principali dinamiche temporali (variazioni intra- ed inter-annuali) devono essere registrate coerentemente dalle due reti.

### *2.3.2 Stima di AOT40*

Le concentrazioni di ozono sono state convertite da  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  a ppb, applicando il coefficiente di conversione di 1.9632, riferito a condizioni di pressione e temperatura normali ( $P=1.013$  mbar e  $T=25^\circ\text{C}$ ). Per le stime si è proceduto al calcolo delle concentrazioni orarie di ozono in ciascun sito mediante la funzione di Loibl et al. (1994), che riproduce i livelli di ozono a partire dalla quota relativa del sito stesso e dall'ora del giorno. La quota relativa è stata calcolata mediante differenza tra la quota altimetrica del sito e quella del punto più basso in un intorno di 5 km. La funzione che riproduce l'evoluzione giornaliera delle concentrazioni di ozono è stata quindi traslata in modo che la media delle concentrazioni orarie coincidesse con la concentrazione media oraria restituita dai dosimetri passivi, e replicata per un numero di giorni pari alla durata dell'esposizione di ciascun dosimetro. I dettagli possono essere reperiti in Gerosa et al. (2003, 2007) ed in Gottardini et al. (2010).

### *2.3.3 Modellistica*

#### 2.3.3.1 Dati di input

Per il 2008, il numero totale di siti disponibili per il modello geostatistico è risultato pari a 21, considerando la media delle concentrazioni di ozono dalla settimana dal 21/05 al 30/07 (11 settimane). I dati si riferiscono sia alle centraline APPA che ai dosimetri passivi. In Tabella 4 vengono riportati il nome e le coordinate delle singole osservazioni, insieme ai valori mediati delle concentrazioni di ozono. La quota di ciascuna centralina/dosimetro è riportata in Tabella 4. Per le temperature, i valori settimanali sullo stesso intervallo temporale (21/05 – 30/07) sono stati quasi sempre misurati in loco e mediati (Tabella 4). Laddove le misurazioni erano mancanti, sono stati utilizzati i dati derivati dal modello spaziale delle temperature fornito da FBK (programma ENVIROCHANGE). Per la spazializzazione si è invece sempre fatto ricorso a dati modellati su tutta la provincia (vedi Capitolo 3.1.2.2).

Tabella 4. Quota, temperatura e localizzazione dei 21 punti di misura delle concentrazioni di O<sub>3</sub> nel 2008.

Nome Sito	X_coord	Y_coord	O3	Quota (m)	T (C°)
FONDO	1665949	5148025	66.88	1375.48	13.78
CANAZEI	1713980	5148362	72.66	1587.58	11.27
PEIO	1632826	5133037	74.51	1675.31	13.29
CLES	1651186	5132648	87.76	1698.01	12.61
COREDO	1665450	5132359	71.97	1389.11	14.45
PREDAZZO	1699060	5132798	73.33	1463.96	13.23
TONADICO	1713788	5132795	100.15	1853.55	10.49
FAEDO	1665324	5118424	80.77	306.06	20.80
BEDOLLO	1680976	5117859	67.97	1399.61	12.69
CASTELLO TESINO	1698517	5117954	65.87	1548.79	12.76
LEVICO TERME	1680918	5100063	66.47	1105.10	15.10
CONDINO	1617253	5081830	137.37	1855.97	10.04
CONCEI	1635204	5084579	99.61	1308.82	15.45
TRENTO	1665808	5099179	65.76	359.48	20.02
FOLGARIA	1666290	5084879	80.17	1209.55	14.66
TRENTO PSC	1664477	5103260	61.16	203.00	21.55
CAVALESE	1692734	5128608	63.29	888.70	16.19
BORGO VAL	1689884	5102745	63.95	380.00	20.16
RIVA GAR	1643123	5083661	73.82	73.00	21.85
ROVERETO LGP	1658386	5084048	72.80	200.00	21.23
MONTE GAZA	1651418	5105103	101.62	1601.00	11.96

Per l'anno 2009, i punti di raccolta delle concentrazioni di ozono sono risultati in numero maggiore (25). I dati relativi alla concentrazione di ozono su cui è stato sviluppato il modello geostatistico rappresentano le medie delle settimane che vanno dal 20/05 al 05/08 (12 settimane). Le medie ottenute per ciascun punto sono riportate in Tabella 5 assieme a quote e temperature, quest'ultime ottenute da misure in loco. Laddove le misurazioni erano mancanti, sono stati utilizzati i dati derivati dal modello spaziale delle temperature fornito da FBK (programma ENVIROCHANGE) per il 2008. Per quanto riguarda la spazializzazione, non essendo disponibile il modello delle temperature spazializzate per l'anno 2009, si è utilizzato a titolo dimostrativo il modello delle T per l'anno 2008 e le medie sono state calcolate per 12 settimane nel periodo corrispondente.

Tabella 5. Quota, temperatura e localizzazione dei 25 punti di misura delle concentrazioni di O<sub>3</sub> nel 2009.

Nome Sito	X_coord	Y_coord	O3	Quota (m)	T (C)*
FONDO	1665949	5148025	115.66	1375.48	14.08
CANAZEI	1713980	5148362	89.77	1587.58	11.92
PEIO	1632826	5133037	80.50	1675.31	13.29
CLES	1651186	5132648	106.15	1698.01	12.98
COREDO	1665450	5132359	94.69	1389.11	16.32
PREDAZZO	1699060	5132798	97.02	1463.96	13.95
TONADICO	1713788	5132795	119.89	1853.55	11.50
FAEDO	1665324	5118424	85.18	306.06	20.80
BEDOLLO	1680976	5117859	92.62	1399.61	12.69
CASTELLO TESINO	1698517	5117954	88.53	1548.79	12.76
TRENTO	1665808	5099179	83.50	359.48	22.35
LEVICO TERME	1680918	5100063	85.23	1105.10	15.10
CONDINO	1617253	5081830	120.39	1855.97	11.65
CONCEI	1635204	5084579	105.53	1308.82	17.21
FOLGARIA	1666290	5084879	96.65	1209.55	15.90
BRENTONICO	1650217	5069802	137.88	1463.56	14.99
CANAL SAN BOVO	1715044	5119100	114.31	1503.03	14.15
PINZOLO	1636967	5116462	68.95	971.44	16.98
TIONE	1633074	5099886	84.32	718.67	18.79
ANDALO	1653255	5115751	115.57	1563.45	13.23
TRENTO P.S.C.	1664477	5103260	76.69	203.00	21.55
ROVERETO L.P.	1658386	5084048	90.95	200.00	21.23
BORGO VAL	1689884	5102745	67.35	380.00	20.16
RIVA GAR	1643123	5083661	78.53	73.00	21.85
MALGA GAZA	1651418	5105103	102.80	1601.00	11.96

### 2.3.3.2 Metodi geostatistici

All'interno delle statistiche spaziali, il termine "geostatistica" si riferisce a quei modelli e metodi sviluppati per dati che presentano le seguenti caratteristiche:

i valori di una variabile  $Y_i$ ;  $i = 1, \dots, n$  sono osservati per un set discreto di punti di osservazioni  $x_i$  all'interno di una determinata area  $A$  (comune, provincia, regione o nazione, ad esempio);

ogni valore osservato  $Y_i$  rappresenta una misura diretta, o comunque risulta statisticamente relazionato al valore di un certo fenomeno continuo nello spazio  $S(x)$  ("segnale", in termini geostatistici; ad esempio si può annoverare come fenomeno continuo nello spazio la concentrazione di ozono, oppure la concentrazione di un certo inquinante nel suolo), per quella specifica località  $x_i$  (Diggle & Ribeiro 2007).

Gli obiettivi principali di un'analisi geostatistica sono fondamentalmente rappresentati dal processo di stima e di predizione:

1) il processo di stima si riferisce alla necessità di fare inferenza relativamente ai parametri di un processo stocastico partendo dai dati raccolti. Vengono quindi considerati e stimati quei parametri



di interesse diretto, come ad esempio quelli che definiscono una relazione regressiva tra una variabile di risposta (la concentrazione di ozono) e una variabile di tipo esplicativo (la temperatura), oppure i parametri di interesse indiretto, per esempio quelli che definiscono la struttura di covarianza per il modello del “segnale” in analisi  $S(x)$ .

2) il processo previsionale si riferisce invece all'inferenza che viene effettuata relativamente alla realizzazione di un “segnale”  $S(x)$  non osservato. Da un punto di vista applicativo, l'obiettivo specifico di una previsione potrebbe includere la predizione di un certo fenomeno  $S(x)$  per una arbitraria località  $x$  all'interno di una certa area  $A$ . Il risultato di questo processo viene classicamente rappresentato da una mappa dell'area  $A$  in cui vengono riportati i valori predetti di  $S(x)$  per tutte le possibili località  $x$ .

Date queste premesse concettuali, si è proceduto, attraverso le metodologie geostatistiche, a creare delle previsioni spazialmente continue della concentrazione di ozono, relativamente all'intera superficie della Provincia di Trento per gli anni 2008 e 2009. Partendo dai dati puntiformi e discreti disponibili per le concentrazioni di ozono è stato necessario formulare un modello formale e successivamente, sono stati stimati tutti i parametri necessari alla sua definizione.

Sulla base dei parametri utilizzati e stimati, sono stati poi successivamente spazializzati (predetti) i valori di ozono su tutta l'area di interesse, separatamente per i due anni indagati. Si procede alla descrizione dettagliata del metodo di formulazione del modello, di stima dei parametri e, infine, di spazializzazione utilizzata. Ovviamente, come per ogni analisi statistica che si effettua, è necessario, in fase preliminare, realizzare un'analisi esplorativa dei dati grezzi, così da essere in grado di selezionare le adeguate trasformazioni e i diversi accorgimenti per rendere i modelli previsionali il più robusti possibili. Queste analisi esplorative vengono quindi descritte come primo punto del procedimento complessivo.

#### Analisi esplorative

i) Non-Spaziali: per ciascun set di dati (2008 e 2009) sono stati sviluppati degli istogrammi relativi alla distribuzione delle frequenze delle concentrazioni di ozono. L'obiettivo di tale operazione è di fornire uno strumento semplice ed immediato per comprendere l'esistenza di asimmetrie evidenti nella distribuzione dei valori (deviazione dalla Normalità), così come di evidenziare la presenza di *outliers*. Per descrivere quantitativamente la deviazione nei valori medi di ozono da una distribuzione normale, è stato applicato un test Shapiro Wilk (1965). Dove necessario, si è proceduto alla normalizzazione dei dati attraverso la famiglia di trasformazioni Box-Cox (Box & Cox 1964).

ii) Spaziali: il metodo più semplice per analizzare quantitativamente la dipendenza spaziale nella distribuzione della variabile di interesse è di effettuare una semplice regressione tra la variabile di risposta e le singole componenti spaziali (latitudine e longitudine). Inoltre, per verificare se i dati di concentrazione di ozono misurati presentano una forte dipendenza spaziale (rispondendo, in altri termini, alla ben nota legge dell'autocorrelazione spaziale), è stato calcolato un semivariogramma empirico per la media della concentrazione per anno considerato. Da un punto di vista generale, per ogni set di dati spazialmente definiti come  $(x_i, y_i) : i = 1, \dots, n$ , le ordinate del semivariogramma empirico rappresentano le quantità

$$v_{ij} = \frac{1}{2}(y_i - y_j)^2$$

Se i valori  $y_i$  presentano una media e una varianza spazialmente costante, allora i valori  $v_{ij}$  sono proporzionali a

$$\sigma^2 \{1 - \rho(x_i, x_j)\}$$

dove  $\sigma^2$  rappresenta la varianza, mentre  $\rho(x_i, x_j)$  quantifica la correlazione esistente tra i valori di  $y_i$  e  $y_j$ .

Se gli  $y_i$  sono generati da un processo spaziale stazionario, allora si avrà che il valore  $\rho(\cdot)$  dipende esclusivamente dalla distanza tra  $x_i$  e  $x_j$  e tende allo 0 all'aumentare della distanza considerata. Ne consegue che i valori attesi di  $v_{ij}$  tendono ad un valore costante rappresentato da  $\sigma^2$ , allorché la distanza  $u_{ij}$  tra  $x_i$  e  $x_j$  aumenta. Al contrario, se i valori  $y_i$  non sono tra loro spazialmente correlati, allora tutti i valori  $v_{ij}$  assumeranno il valore  $\sigma^2$ . Il semivariogramma viene quindi rappresentato, per comodità di lettura, come i valori di  $v_{ij}$  (solitamente il valore medio di semivarianza mediato per la classe di distanza considerata) verso la corrispondente distanza  $u_{ij}$ . Da un punto di vista pratico, ciò significa che se la semivarianza  $v_{ij}$  in un semivariogramma tende ad aumentare in modo costante, questo risultato potrà essere interpretato come se i valori osservati della variabile di risposta sono stati generati da un processo stocastico di tipo stazionario. In altre parole, l'intervallo della correlazione spaziale esistente tra i valori della variabile si estenderà anche al di fuori dell'area di studio esaminata. Al contrario, se il semivariogramma presenta un classico andamento in cui inizialmente i valori di  $v_{ij}$  crescono per poi raggiungere un andamento asintotico al crescere della distanza tra punti di osservazione, l'autocorrelazione spaziale esistente tra le osservazioni potrà essere correttamente stimata e parametrizzata (attraverso la stima dei parametri del semivariogramma, si veda in seguito) e inclusa nel modello predittivo finale, per ottenere stime maggiormente accurate.

### Formulazione del modello geostatistico

Classicamente, un modello geostatistico viene specificato nel seguente modo: in assenza di qualsiasi variabile esplicativa (e.g., quota), e considerando  $(x_i, y_i)$ :  $i = 1, \dots, n$  le località  $x_i$  in cui sono stati misurati i valori della variabile di interesse  $y_i$ , si ha che il modello stazionario Gaussiano è specificato dalle due componenti:

1)  $\{S(x) : x \in \mathcal{R}^2\}$  rappresenta un processo Gaussiano con media  $\mu$ , varianza  $\sigma^2 = \text{Var}\{S(x)\}$  e funzione di correlazione  $\rho(u) = \text{Corr}\{S(x), S(x')\}$ , dove, come in precedenza,  $u = \|x - x'\|$  e  $\|\cdot\|$  esprimono la distanza tra i punti di misurazione.

2) condizionate rispetto a  $\{S(x) : x \in \mathcal{R}^2\}$ , le misurazioni  $y_i$  rappresentano misurazioni mutualmente indipendenti della variabile casuale  $Y_i$ , normalmente distribuite con media condizionale  $E[Y_i | S(\cdot)] = S(x_i)$ .

In forma più semplice, il modello può essere specificato utilizzando la seguente notazione

$$Y_i = S(x_i) + Z_i : i = 1, \dots, n$$

dove  $\{S(x) : x \in \mathcal{R}^2\}$  è definito dall'assunto al punto uno precedentemente descritto, mentre  $Z_i$  sono variabili random con distribuzione  $N(0, \tau^2)$  mutualmente indipendenti.

### Componenti spaziali e non del modello geostatistico e stima dei loro parametri

Il modello geostatistico appena descritto, necessita dunque di diverse specificazioni e della stima di molti parametri. In particolare:

- *componente spaziale*: al fine di specificare un modello corretto, la funzione di correlazione  $\rho(u)$  (quindi la componente spaziale in senso stretto) deve essere positivamente definita. Questa componente, che tende a 0 al crescere della distanza tra le osservazioni, viene graficamente descritta come la componente del semivariogramma che esprime il tasso di crescita della semivarianza al crescere della distanza (quando il semivariogramma assume un andamento asintotico al crescere della distanza  $u_{ij}$ , significa che la funzione di correlazione tra le osservazioni  $\rho(u)$  tende al valore 0). La funzione  $\rho(u)$  viene stimata fittando al semivariogramma empirico una funzione definita Matern, esplicitata come:

$$\rho(u) = \{2^{\kappa-1} \Gamma(\kappa)\}^{-1} (u/\phi)^{\kappa} K_{\kappa}(u/\phi)$$

e di cui deve essere stimato il parametro di scala  $\phi$  (per la spiegazione degli altri parametri, si rimanda direttamente a Diggle & Ribeiro 2007). Poiché la componente spaziale è rappresentata

anche dagli altri parametri che descrivono il semivariogramma, sempre utilizzando il semivariogramma empirico costruito sui dati misurati, dovranno essere stimati l'intercetta  $\tau^2$  (definita anche *nugget* e che rappresenta il valore di semivarianza alla distanza pari a 0; ove sia maggiore di 0, rappresenta la variabilità nei valori osservati dovuta alla varianza presente a scale di osservazione inferiori rispetto a quella considerata e che non è possibile descrivere –rumore o variazione stocastica) e il valore di semivarianza raggiunto nella parte asintotica del semivariogramma, pari a  $\tau^2 + \sigma^2$  (questo valore viene definito anche *sill*, che corrisponde alla somma della varianza *nugget* e alla varianza del processo osservato  $\sigma^2$ , come precedentemente definita). Riassumendo, dunque, per descrivere la struttura di covarianza spazialmente esplicita delle concentrazioni medie di ozono per ciascun anno considerato, sono stati stimati 3 diversi parametri a partire dal semivariogramma empirico costruito sui dati:  $\tau$ ,  $\tau^2$  e  $\sigma^2$ ;

- *predittori ambientali*: la variazione della variabile di interesse rispetto alle diverse località in cui questa viene misurata, può direttamente essere dipendente dalla contestuale variazione di altri parametri fisico-chimici, così come anche topografici. Al fine di considerare questi effetti all'interno di un modello geostatistico, si deve considerare che il valore medio  $\mu$  del “segnale” in analisi  $S(x)$  è dato da:

$$\mu = \beta_0 + \sum \beta_i d_i(x)$$

dove, come in un classico modello regressivo di tipo lineare,  $\beta_0$  rappresenta l'intercetta, mentre  $d_i: i=1, \dots, n$  rappresentano gli *i-esimi* predittori e  $\beta_i: i=1, \dots, n$  i rispettivi coefficienti. L'introduzione di predittori all'interno di un modello geostatistico dà vita a un modello definito “a media non costante”. Per questo tipo di modelli, dovranno dunque essere stimati tutti i parametri (coefficienti) relativi a ciascun predittore più, ovviamente, il parametro che esprime l'intercetta.

Per quanto riguarda le concentrazioni di ozono (relativamente a ciascun anno considerato), sono stati utilizzati, i seguenti predittori continui: 1) *quota*, 2) *temperatura*, 3) *latitudine*, 4) *longitudine*.

Si noti comunque che, data la mancanza dei dati medi stagionali di temperature per l'anno 2009 per alcuni siti, in questi casi si sono presi i valori di questo predittore riferibili all'anno 2008. L'analisi ha avuto come obiettivo quello di sviluppare un modello “parsimonioso”, ovvero in grado di spiegare il massimo della varianza con il minor numero di predittori. Per questo scopo, oltre il fit individuale dei predittori rispetto alle concentrazioni medie di ozono (per valutare la varianza spiegata da ogni singolo predittore), è stato costruito un modello nullo (solo con i parametri spaziali, come definiti al punto precedente) e un modello totale (considerando invece congiuntamente tutti i predittori all'interno del modello). Dal confronto di questi due modelli, e attraverso una procedura di eliminazione progressiva di predittori dal modello totale (*stepwise* di tipo *backward*) si è giunti alla formulazione del miglior modello parsimonioso. Per evitare al

massimo grado la soggettività nella selezione di un modello parsimonioso rispetto ad un altro, è stato inoltre adottato, in fase di *backward selection*, un duplice criterio di selezione (esclusione nel particolare caso in analisi) dei predittori: infatti, oltre a considerare il valore di verosimiglianza dei vari modelli ridotti rispetto ai dati di concentrazione stagionale di ozono (*log-likelihood*, dove ad un valore più alto di questo parametro corrisponde una maggiore similarità del fit del modello rispetto ai dati osservati), è stato calcolato per ogni step, il valore della statistica AIC (Akaike Information Criterion, Burnham & Anderson 2002). Il valore di AIC per un determinato modello viene determinato dalla seguente equazione:

$$AIC = 2k - 2\ln(L)$$

dove  $k$  rappresenta il numero di parametri stimati nel modello statistico,  $L$  rappresenta invece il valore di massima verosimiglianza per il medesimo modello. Un altro modo di esprimere l'AIC, dato  $n$  il numero dei casi osservati (n° delle osservazioni e repliche) e definiti RSS come la somma dei quadrati dei residui, si ottiene:

$$AIC = 2k + n[\ln(2\pi RSS / n) + 1].$$

Nella costruzione dei modelli basati sul calcolo dell'AIC si preferiscono soluzioni in cui il valore di questa statistica è minimizzato. In altre parole, mediante l'utilizzo dell'AIC si tenta di trovare il modello migliore in grado di spiegare i dati a disposizione utilizzando il minor numero di parametri. L'utilizzo del duplice criterio di selezione ha permesso di effettuare la scelta del miglior modello parsimonioso.

Per quanto riguarda la stima dei parametri (spaziali e non) del modello, la metodologia applicata è stata quella della massimizzazione della verosimiglianza (*maximum likelihood*) per il cui calcolo si rimanda a testi specialistici (Pawitan 2001). Tutte le analisi sono state effettuate utilizzando il software R (R Development Core Team 2010).

### 2.3.3.3 Spazializzazione del modello geostatistico

Una volta controllata l'accuratezza del modello sviluppato, i parametri stimati (spaziali e relativi alle variabili ambientali) sono stati utilizzati per la predizione spaziale dei valori delle concentrazioni di ozono per tutta la provincia di Trento. In particolare, per ottenere i valori di ozono per ciascuna delle celle di 1x1 km ottenute, è stato applicato il metodo definito di "kriging" semplice. Le concentrazioni di ozono, per ogni località di interesse, sono state dunque calcolate come:

$$S(x) = \mu + \sum_{i=1}^n w_i(x)(y_i - \mu)$$

dove  $w_i(x)$  sono funzioni esplicite dei parametri di covarianza  $\Pi$ ,  $\tau^2$  e  $\sigma^2$ .

Le mappe di sintesi della concentrazione di ozono e della corrispondente varianza sono state realizzate attraverso l'utilizzo di un sistema integrato SIT costituito da software GIS open-source tipo gvSIG e Quantum GIS e relational database management system (PostgreSQL e PostGIS).

#### 2.3.3.5 Validazione del modello geostatistico via Leave One Out

Per la validazione di un modello di regressione è consuetudine basarsi su tecniche di *cross validation*, ovvero su metodiche di validazione che prevedono la costruzione del modello su di un dataset privato di una o più osservazioni, che poi vengono successivamente predette dal modello stesso. In base alla capacità del modello di predire le osservazioni, è possibile valutarne l'efficienza (in termini di errore sulla stima). Il metodo di validazione utilizzato per i modelli 2008-2009 della concentrazione stagionale dell'ozono è stato il *leave one out* (LOO). Questo sistema di validazione prevede l'esclusione di un'osservazione alla volta dal set totale delle osservazioni. Una semplice regressione tra valori predetti in fase di LOO e valori osservati per ciascun punto è stata calcolata per ottenere una stima della bontà del modello (goodness of fit).

#### *2.3.4 Analisi di rischio potenziale*

L'analisi di rischio potenziale si propone di individuare e quantificare le superfici vegetate per le quali sono superate i livelli di ozono al di sopra dei quali sono da attendersi effetti dannosi su qualità e quantità della produzione.

L'elaborazione dei layout finale delle mappe di rischio ha previsto l'importazione dei valori predetti di AOT40 da un file csv e la successiva proiezione sistema di riferimento spaziale UTM-WGS84. La griglia di riferimento è stata realizzata utilizzando i punti come centri di massa di celle chilometriche che costituiscono la griglia stessa. Attraverso operazioni di connessione spaziale tra strati sovrapposti è stato associato il valore della predizione alla cella corrispondente. Il modello ottenuto è stato ritagliato sulla base delle classi di uso del suolo estratte dal Corine Land Cover (CLC) della Provincia di Trento (Tabella 6), e riaggregate sulla base di caratteristiche omogenee (Tabella 7). Sono state quindi ottenute 5 mappe relative alle classi forestali (boschi di latifoglie, boschi di conifere, faggete, abetine e boschi totali), 1 mappa relative a tutta la vegetazione naturale presente e 1 mappa relativa alle classi agricole.

*Tabella 6. Classi di uso del suolo utilizzate nell'analisi di rischio potenziale.*

COD_CLC	DESCRIZIONE	AREA (ha)
3123	Bosco di abete bianco e/o abete rosso	140225
3212	Praterie discontinue	64705
3124	Bosco di larice e/o pino cembro	40303
31315	Boschi misti a prevalenza di faggio	30756
31323	Boschi misti a prevalenza di abete bianco e/o abete rosso	29692
322	Brughiere e cespuglietti	25256
243	Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi	23455
231	Prati stabili	23310
3113	Bosco di latifoglie mesofile	20986
31313	Boschi misti a prevalenza di latifoglie mesofile	19448
3115	Bosco di faggio	19021
242	Sistemi colturali e particellari complessi	18308
31322	Boschi misti a prevalenza di pini montani e/o oro mediterranei	15099
3122	Bosco di pini montani e oro mediterranei	13914
222	Frutteti e frutti minori	10299
241	Colture temporanee associate a colture permanenti	9817
31324	Boschi a prevalenza di larice e/o pino cembro	6156
221	Vigneti	4882
3112	Bosco di querce caducifoglie	4242
31312	Boschi misti a prevalenza di querce caducifoglie	3297
244	Aree agroforestali	2478
31321	Boschi misti a prevalenza di pini mediterranei	873
3121	Bosco di pini mediterranei	664
211	Seminativi	583
31314	Boschi misti a prevalenza di castagno	383
3211	Praterie continue	329
31311	Boschi misti a prevalenza di leccio	167
3111	Bosco di leccio e sughera	114
3116	Bosco di specie igrofile	86
31316	Boschi misti a prevalenza di specie igrofile	69
3114	Bosco di castagno	57
Totale		528974

Tabella 7. Aggregazione delle classi di uso del suolo utilizzate nelle varie mappe di rischio potenziale.  
Continua nella pagina successiva.

**Per mappa foreste**

<b>COD_CLC</b>	<b>DESCRIZIONE</b>	<b>Area (ha)</b>	<b>Area</b>
3123	Bosco di ab. bianco e/o ab. Rosso	140225	40.6
3124	Bosco di larice e/o pino cembro	40303	11.7
31315	Boschi misti a prev. di faggio	30756	8.9
31323	Boschi misti a prev. di ab. bianco e/o ab. Rosso	29692	8.6
3113	Bosco di latif. Mesofile	20986	6.1
31313	Boschi misti a prev. di latifoglie mesofile	19448	5.6
3115	Bosco di faggio	19021	5.5
31322	Boschi misti a prev. di pini montani e/o	15099	4.4
3122	Bosco di pini montani e oromediterranei	13914	4.0
31324	Boschi a prev. di larice e/o pino cembro	6156	1.8
3112	Bosco di querce caducifoglie	4242	1.2
31312	Boschi misti a prev. di querce caducifoglie	3297	1.0
31321	Boschi misti a prev. di pini mediterranei	873	0.3
3121	Bosco di pini mediterranei	664	0.2
31314	Boschi misti a prev. di castagno	383	0.1
31311	Boschi misti a prev. di leccio	167	0.0
3111	Bosco di leccio e sughera	114	0.0
3116	Bosco di specie igrofile	86	0.0
31316	Boschi misti a prev. di specie igrofile	69	0.0
3114	Bosco di castagno	57	0.0
<b>Totale</b>		<b>345552</b>	<b>100.0</b>

**Per mappa conifere**

<b>COD_CLC</b>	<b>DESCRIZIONE</b>	<b>Area (ha)</b>	<b>Area</b>
3123	Bosco di ab. bianco e/o ab. rosso	140225	40.6
3124	Bosco di larice e/o pino cembro	40303	11.7
31323	Boschi misti a prev. di ab. bianco e/o ab. rosso	29692	8.6
31322	Boschi misti a prev. di pini montani e/o	15099	4.4
3122	Bosco di pini montani e oromediterranei	13914	4.0
31324	Boschi a prev. di larice e/o pino cembro	6156	1.8
31321	Boschi misti a prev. di pini mediterranei	873	0.3
3121	Bosco di pini mediterranei	664	0.2
<b>Totale</b>		<b>246926</b>	<b>71.5</b>










**Per mappa latifoglie**

<b>COD_CLC</b>	<b>DESCRIZIONE</b>	<b>Area (ha)</b>	<b>Area</b>
31315	Boschi misti a prev. di faggio	30756	8.9
3113	Bosco di latif. mesofile	20986	6.1
31313	Boschi misti a prev. di latifoglie mesofile	19448	5.6
3115	Bosco di faggio	19021	5.5
3112	Bosco di querce caducifoglie	4242	1.2
31312	Boschi misti a prev. di querce caducifoglie	3297	1.0
31314	Boschi misti a prev. di castagno	383	0.1
31311	Boschi misti a prev. di leccio	167	0.0
3111	Bosco di leccio e sughera	114	0.0
3116	Bosco di specie igrofile	86	0.0
31316	Boschi misti a prev. di specie igrofile	69	0.0
3114	Bosco di castagno	57	0.0



Attraverso l'applicazione di 3 legende di riferimento (relative ai limiti EU long-term e target ed al livello critico UN/ECE) per ciascuna mappa sono stati realizzati i layout grafici corrispondenti, e le relative statistiche di superficie. Le legende di riferimento sono state definite in modo arbitrario ma in modo da evidenziare le situazioni in cui i limiti erano sostanzialmente rispettati (valori entro il livello di rischio), situazioni in cui il livello di rischio era superato sino a due volte il suo valore e situazioni in cui il livello rischio era superato oltre due volte il suo valore (Tabella 8).

*Tabella 8. Classi di AOT40 e corrispondenti situazioni di rischio potenziale per diversi target con relativi colori di rappresentazione.*

<b>Classi di AOT40</b>	<b>Threshold</b>	<b>Risk</b>	<b>Target</b>	<b>Colour</b>
<6000	EU Long-	No risk	Vegetation	
>6000-12000	EU Long-	Exceedance $\leq 2$	Vegetation	
>12000	EU Long-	Exceedance > 2	Vegetation	
<10000	UN/ECE	No risk	Forests	
>10000-20000	UN/ECE	Exceedance $\leq 2$	Forests	
>20000	UN/ECE	Exceedance > 2	Forests	
<18000	EU Target	No risk	Vegetation	
>18000-36000	EU Target	Exceedance $\leq 2$	Vegetation	
>36000	EU Target	Exceedance > 2	Vegetation	

È stato inoltre acquisito un modello digitale del terreno (DEM) in formato GRID (ESRI), con una risoluzione spaziale originale di 75 metri, tagliato ai confini della Provincia di Trento e ricampionato sulla base della grana specifica della griglia utilizzata, al fine di operare elaborazioni statistiche di superficie sulla base della diversa altimetria. Il DEM è stato quindi riclassificato in 9 classi altimetriche con un intervallo di 400 metri e sulla base di ciascuna classe sono state estratte statistiche descrittive della concentrazione di ozono al suolo.

### 3. Risultati

#### 3.1 Ozono in Trentino

##### 3.1.1 Concentrazioni ed esposizione

L'andamento delle concentrazioni misurate dai dosimetri passivi è stato confrontato con quello rilevato dalle centraline APPA (Figura 9). Come si vede, i due sistemi rilevano coerentemente l'andamento intra-annuale, ma pare esserci un progressivo scostamento per le curve inter-annuali. Tale scostamento sembra essenzialmente dovuto ad un forte aumento dei valori registrati dai passivi non registrato dalle centraline APPA. Abbiamo quindi applicato una correzione basata sul rapporto esistente tra i valori registrati dai passivi e dalle centraline APPA nel 2007, assunto come anno di riferimento, e pari a 0.79. I dati dei passivi sono stati quindi corretti ed i risultati riportati in figura 9. Come si vede, sebbene sempre superiori a quelli rilevati da APPA (cosa prevedibile data la diversa disposizione spaziale dei siti), la correzione porta ad un sostanziale riallineamento dei valori e porta a valutazioni conservative sull'entità delle concentrazioni di ozono nel periodo esaminato.

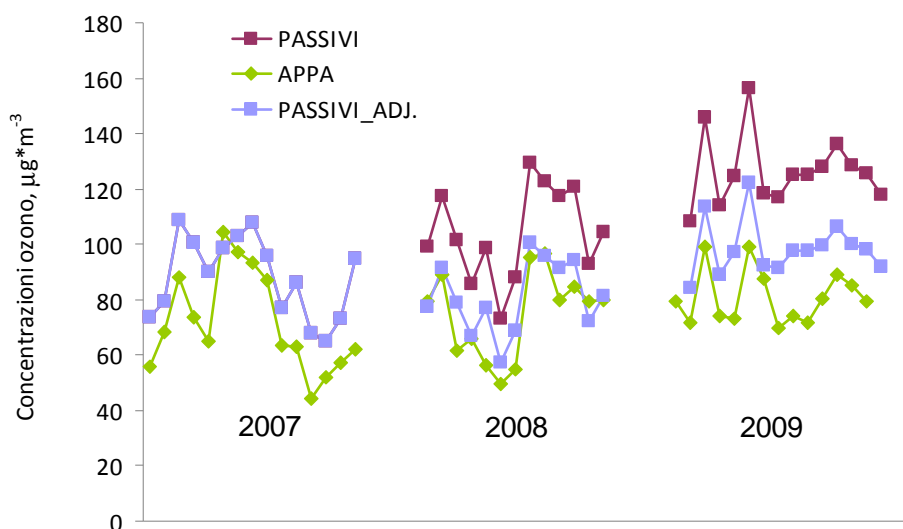


Figura 9. Andamento settimanale delle concentrazioni nei periodi 13/6-19/9/2007, 7/5-30/7/2008 e 13/5-2/9/2009. Passivi: concentrazioni misurate dai dosimetri passivi; APPA: concentrazioni misurate dalle centraline APPA; PASSIVI\_Adj: concentrazioni misurate dai passivi e corrette in fase di elaborazione.

La Tabella 9 riporta i valori medi settimanali delle concentrazioni di ozono e la rispettiva deviazione standard. E' stata aggiunta inoltre in tabella l'informazione sulla completezza del dato raccolto: in particolare per le stazioni di Pinzolo e Tione disponiamo di dati per poco più della metà del periodo di studio e pertanto i valori riportati sono solo indicativi e non confrontabili con gli altri. Tra le possibili cause della perdita di dati ve ne sono alcune non eliminabili e/o risolvibili come la

persistenza di neve anche a quote relativamente basse che ha impedito il raggiungimento di alcune stazioni all'inizio della campagna di misure; altre cause, come la presenza di insetti nelle fiale da analizzare, possono essere in parte risolvibili: una periodica pulizia e controllo del campionatore può in tal caso evitare che si formino ragnatele e nidi di insetti, aiutando a ridurre la perdita di dati.

*Tabella 9. Concentrazioni medie ( $\pm$  deviazione standard) di ozono rilevate tra il 20 maggio ed il 19 agosto 2009 in provincia di Trento e completezza del dato.*

Nome stazione	completezza %	[O <sub>3</sub> ] media $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		
PINZOLO	62	68,8	$\pm$	16,45
PEIO	92	81,1	$\pm$	11,47
TRENTO	85	83,8	$\pm$	6,70
TIONE	62	84,0	$\pm$	10,62
LEVICO TERME	92	85,1	$\pm$	13,78
FAEDO	85	86,1	$\pm$	9,68
CASTELLO TESINO	85	89,2	$\pm$	14,64
CANAZEI	100	91,6	$\pm$	14,85
BEDOLLO	100	93,1	$\pm$	23,19
COREDO	100	94,6	$\pm$	10,69
FOLGARIA	92	96,9	$\pm$	11,96
PREDAZZO	100	98,8	$\pm$	15,62
CLES	100	106,0	$\pm$	11,95
CONCEI	100	107,4	$\pm$	30,31
CANAL SAN BOVO	92	113,8	$\pm$	23,88
ANDALO	100	116,3	$\pm$	22,51
FONDO	100	117,0	$\pm$	16,21
TONADICO	100	120,1	$\pm$	22,63
CONDINO	92	121,7	$\pm$	15,51
BRENTONICO	100	140,0	$\pm$	16,75

I valori medi più bassi di concentrazione sono stati registrati nelle stazioni di Pinzolo ( $68.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  – dati incompleti), Peio ( $81.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) e Trento ( $83.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). I valori più elevati sono stati registrati a Tonadico ( $120.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), Condino ( $121.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) e Brentonico ( $140.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Analizzando i dati rilevati nelle tre campagne di misura (2007-2008-2009) possiamo trarre dalla Figura 10 indicazioni sui valori medi di concentrazione di ozono rilevati nel periodo comune di misure (10 giugno – 1 agosto). In verde si riportano per lo stesso periodo i valori delle nuove stazioni, dove le misure sono iniziate solo nel 2009.

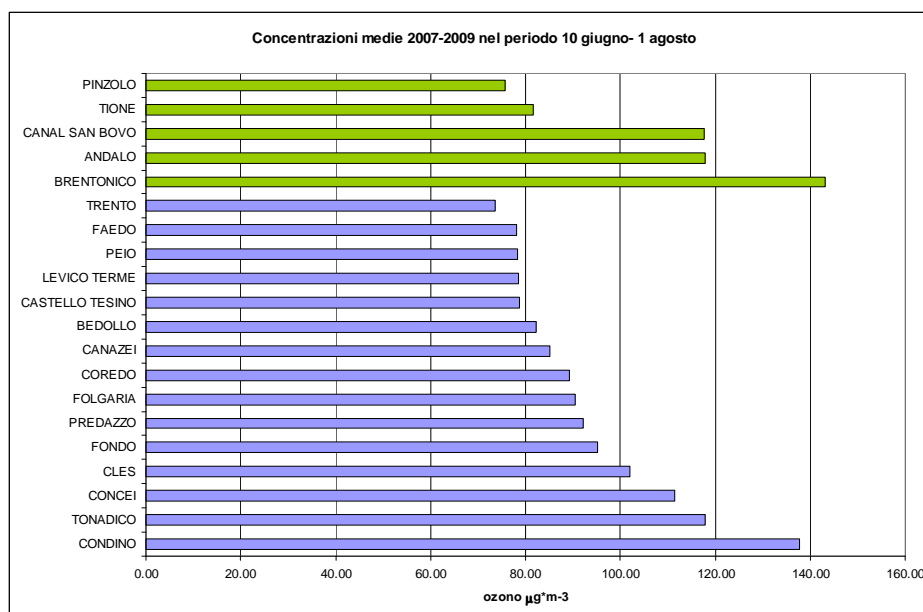


Figura 10. Concentrazioni di ozono registrate nel 2009 (verde) valori medi 2007-2009 (viola) nel periodo 10 giugno -1 agosto espressi in  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Dal confronto con gli anni precedenti nel periodo corrispondente si deduce come nel 2009 i valori registrati siano maggiori rispetto al 2008 per tutte le stazioni con l'unica eccezione della stazione di Condino (Figura 11). Rispetto ai dati del 2007, il 2009 presenta valori superiori in 10 stazioni su 15 (Figura 12). Le differenze registrate sono quasi sempre unidirezionali.

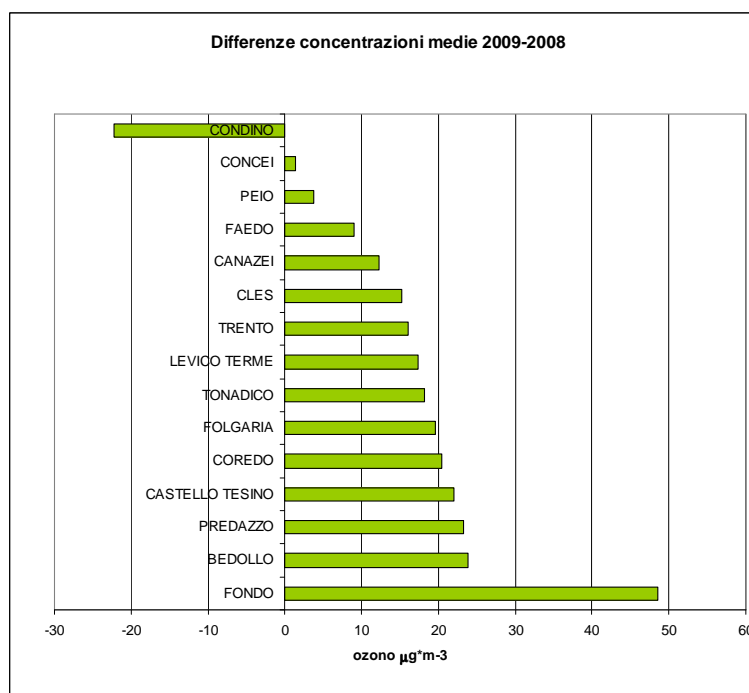


Figura 11. Differenze di concentrazioni medie di ozono tra 2009 e 2008 registrate nel periodo 10 giugno -1 agosto.

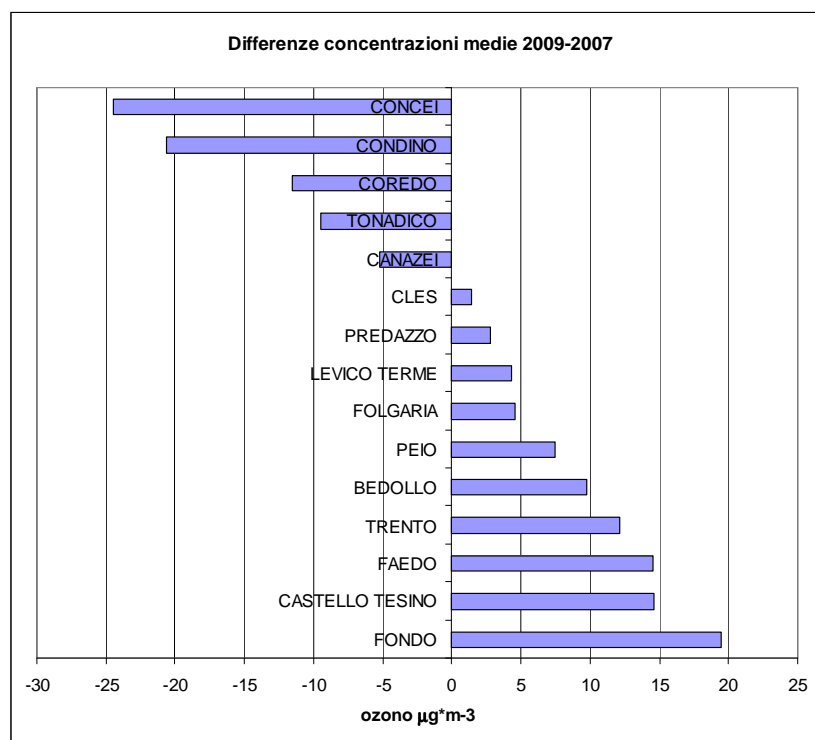


Figura 12. Differenze di concentrazioni medie di ozono tra 2009 e 2007 registrate nel periodo 10 giugno -1 agosto.

Per valutare l'andamento delle concentrazioni di ozono con la quota abbiamo utilizzato i dati raccolti dal 2007 ad oggi. Si conferma come i valori più alti si registrano alle quote più elevate, senza che vi sia però una stretta correlazione (Figura 13).

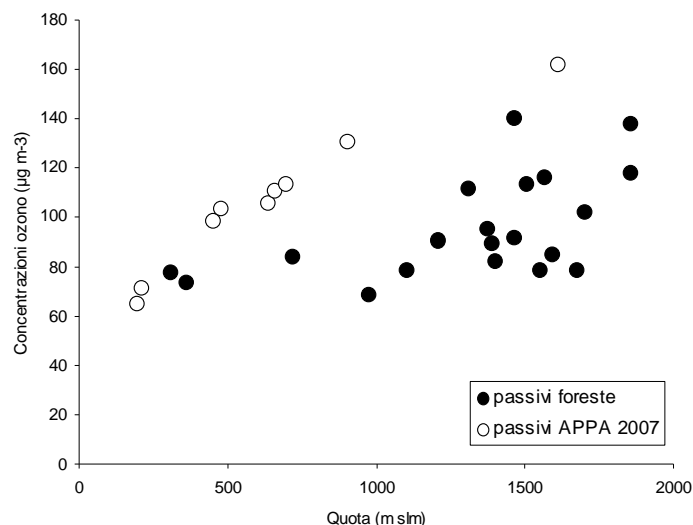


Figura 13. Andamento delle concentrazioni con la quota.

Al fine di valutare il rischio potenziale per la vegetazione che tali concentrazioni di ozono comportano, sono stati calcolati i valori di AOT40 per il 2009, riportati in figura 14. Sono evidenziate in grigio le stazioni di Pinzolo e Tione, poiché i relativi dati sono incompleti. Al fine di interpretare i valori osservati ci si riferisce ai limiti riportati dalla normativa come soglie di protezione della vegetazione. Più precisamente al limite di 3000 ppb\*h EU/Long Term della Direttiva 2008/50/CE ed al limite di 9000 ppb\*h riportato come EU / Target dalla stessa Direttiva.

Si rileva come nel 2009 tutte le stazioni presentano valori di AOT40 superiori al limite EU/Long Term di 3000 ppb\*h , mentre il valore di 9000 ppb\*h EU/Target e' superato da 11 stazioni su 20.

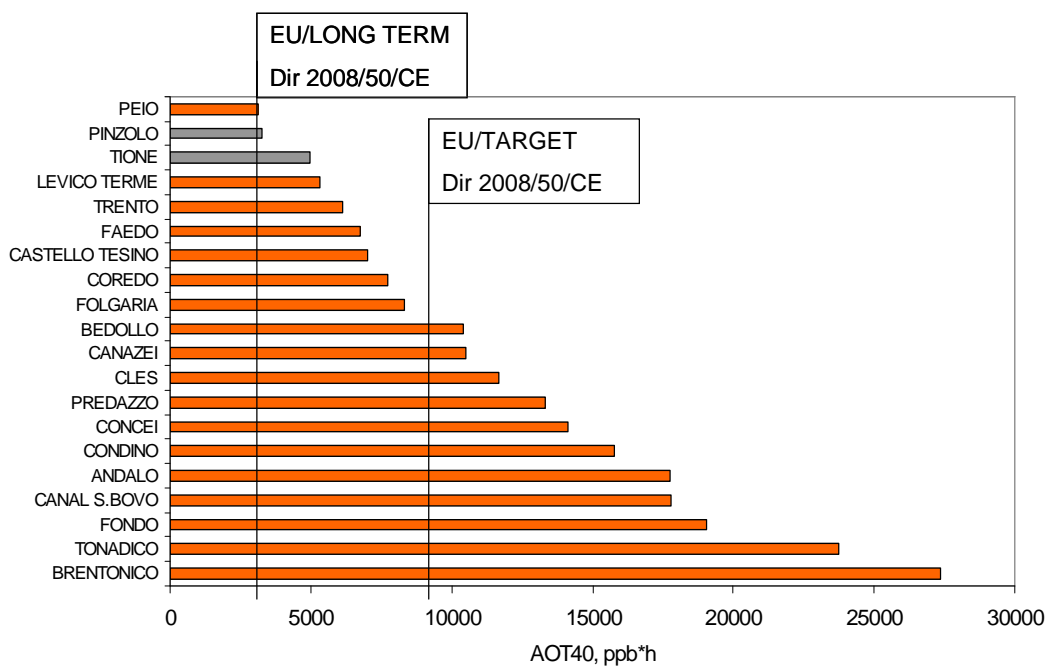


Figura 14. Valori di AOT40 calcolati nel 2009 relativamente al periodo dal 20 maggio al 29 luglio

L'osservazione dell'andamento temporale (Figura 15) evidenzia come entro il mese di giugno del 2009 sia stato raggiunto anche il valore massimo indicato dai limiti di 9000 ppb\*h.

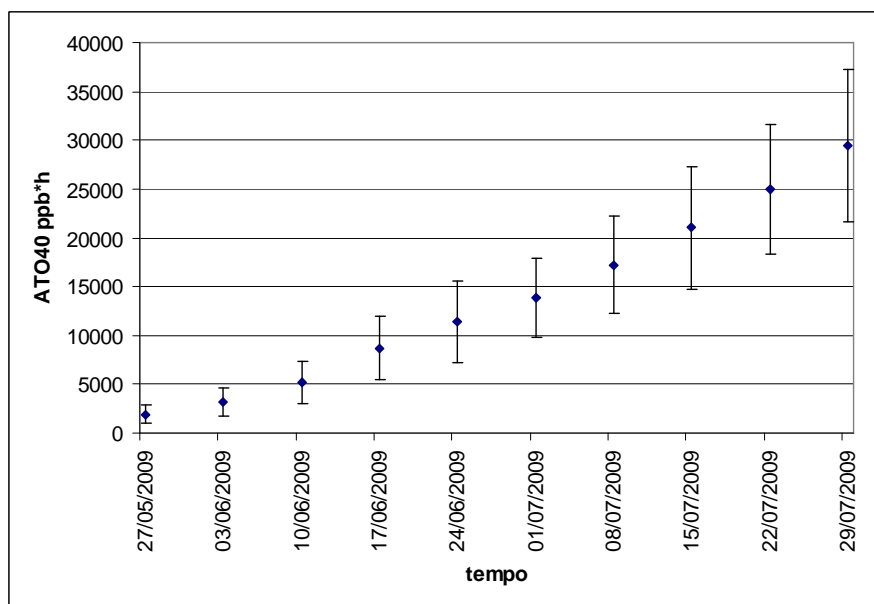


Figura 15. Andamento temporale dei valori di AOT40 registrati nel 2009. Le barre di errore rappresentano la deviazione standard tra le varie stazioni.

Allo scopo di fornire un'indicazione mediata sui tre anni di osservazioni è stato calcolato il valore di AOT40 relativo alle 15 stazioni e per la finestra temporale che mostrava una disponibilità di dati in tutti e tre gli anni (10 giugno – 1 agosto) (Figura 16). Si precisa che, considerando i dati di solo 8 settimane, il valore di AOT40 riportato risulta sottostimato in riferimento all'intervallo temporale stabilito dalla Direttiva 2008/50 (maggio-luglio).

Solo due stazioni presentano valori di AOT40 inferiori a 3000 ppb\*h. La barra sovrapposta ad ogni istogramma, che rappresenta la deviazione standard dei dati rilevati nei tre anni, indica un'elevata variabilità intra-annuale dei valori.

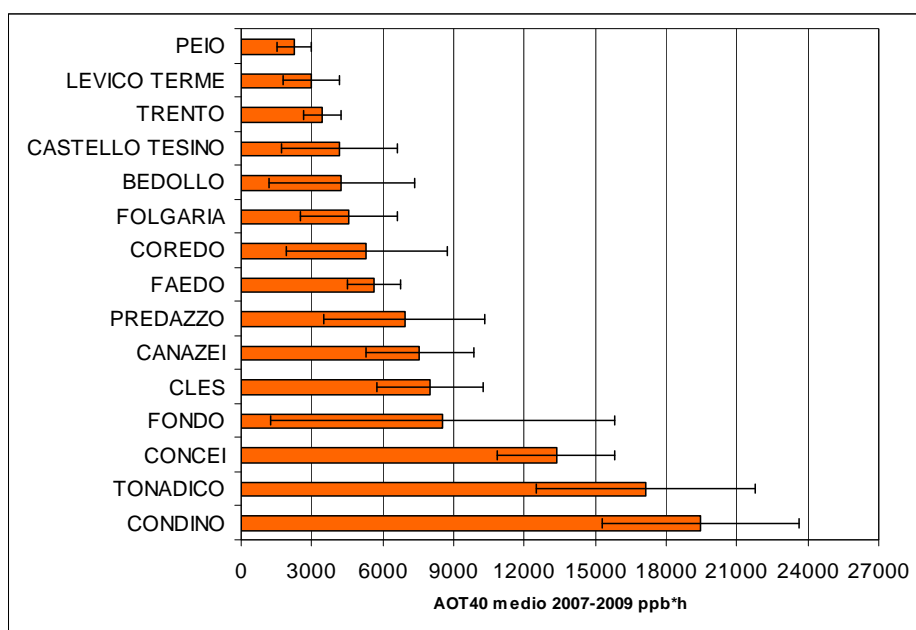


Figura 16. Stima di AOT40: valori medi 2007-2009 e deviazione standard.

### 3.1.2 Modellizzazione e spazializzazione

I dati di concentrazione rilevati nei vari anni e corretti secondo la procedura di cui al capitolo 3.1.1 sono stati usati per la modellizzazione e la spazializzazione a livello provinciale.

#### 3.1.2.2 Affidabilità dei dati di input

Il modello si basa sui dati di ozono quota e temperatura media sul periodo di misurazione. I dati di ozono sono stati discussi nel capitolo precedente ed i dati di quota sono state derivate dal modello digitale del terreno (DTM, *digital terrain model*). I dati di temperatura usati per la costruzione del modello sono stati misurati in loco (11 siti) nel 2008 e 2009. Tuttavia i dati di temperatura utilizzati per la spazializzazione a livello provinciale sono dati modellizzati da FBK (prog. ENVIROCHANGE) a partire da misure Meteotrentino.



L'utilità dei dati misurati in sito nel 2008 è duplice (Tabella 10): da un lato possono essere utilizzati direttamente nel modello (e quindi è possibile basarsi su un predittore effettivamente misurato), dall'altro consentono una valutazione della affidabilità dei dati di temperatura spazializzati sul territorio provinciale.

*Tabella 10. Temperature medie settimanali nei siti di Livello I nel 2008. Le colonne vuote indicano l'assenza di misurazioni.*

Data fine	BEDOLLO	CANAZEI	CASTELLO TESINO CAVALESE	CLES	CONCEI	CONDINO	COREDO	FAEDO	FOLGARIA	FONDO	LEVICO TERME PEIO	PREDAZZO	TONADICO	TRENTO	Trento PSC
07/05/2008	7.3	4.7	10.5				8.8	15.7	9.4	7.5	9.7		5.3	14.7	
14/05/2008	8.5	6.3	12.0				10.3	18.0	10.5	10.1	11.4		5.9	16.9	
21/05/2008	8.2	6.5	11.8				9.7	16.5	9.9	9.4	10.4		5.8	15.4	
28/05/2008	10.3	8.7	14.2			7.7	11.6	18.7	11.8	11.5	13.1		8.2	17.7	
04/06/2008	12.9	11.5	16.1			10.4	14.3	20.7	14.3	14.1	15.2		11.2	19.6	
11/06/2008	9.6	9.1	13.1			7.7	11.5	18.2	11.1	11.6	12.4		8.2	16.8	
18/06/2008	8.6	7.6	12.5			5.9	10.4	17.0	10.4	10.1	10.8		6.5	15.8	
25/06/2008	16.4	14.6	19.9			13.8	17.8	24.4	18.5	17.8	18.8		13.9	23.5	
02/07/2008	17.5	16.2	20.7			14.6	18.8	25.1	19.5	18.5	19.9		14.9	24.8	
09/07/2008	15.3	13.5	18.4			12.3	15.7	22.5	17.2	15.2	17.5		12.6	22.5	
16/07/2008	13.3	12.4	17.3			10.8	14.9	22.0	16.2	14.3	16.0		11.4	21.1	
23/07/2008	12.9	11.4	16.7			10.5	14.2	21.0	15.3	13.4	15.4		10.4	20.5	
30/07/2008	14.7	12.5	17.4			12.7	16.1	22.5	16.9	15.7	16.7		12.3	22.4	
06/08/2008	6.0	20.5	19.8			23.3	23.6	22.9	6.8	18.8	8.1		17.5	26.1	
13/08/2008	17.9	26.1	18.0			25.5	24.9	22.3	10.0	25.5	24.6		22.9	26.0	
19/08/2008	24.0	24.5	21.4			24.0	24.1	24.8	24.2	24.7	24.2		24.4	24.5	

Da quest'ultimo punto di vista, i risultati sono sintetizzati nelle Figure 17-19. Anche se c'è una complessivamente una buona relazione tra dati misurati e predizioni del modello utilizzato (Figura 17), le deviazioni possono essere notevoli per singole settimane (es. 23 maggio e 15 giugno) e siti (Figura 18). Tuttavia, la modellizzazione spaziale dell'ozono viene effettuata sulla base di dati medi sull'intero periodo di misura. Il confronto dei dati mediati evidenzia come l'accordo sia nettamente migliore (Figura 19) e mediamente vicino alla linea 1:1. Solo il sito di Condino mostra differenze notevoli (modellato-misurato: -4.16 °C).

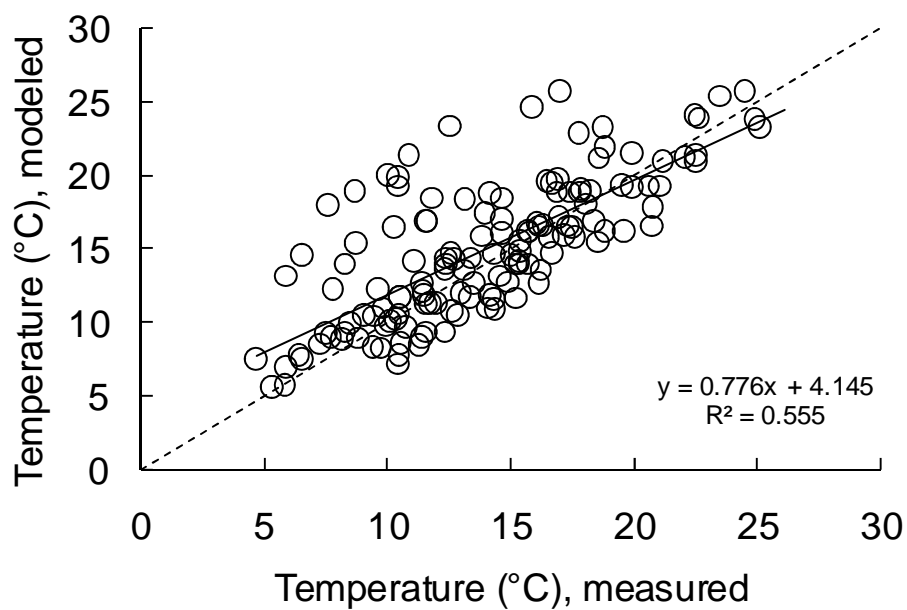


Figura 17. Temperature modellate (asse y) in rapporto a quelle misurate (asse x). La linea tratteggiata indica il rapporto 1:1. La linea continua rappresenta la funzione di regressione.

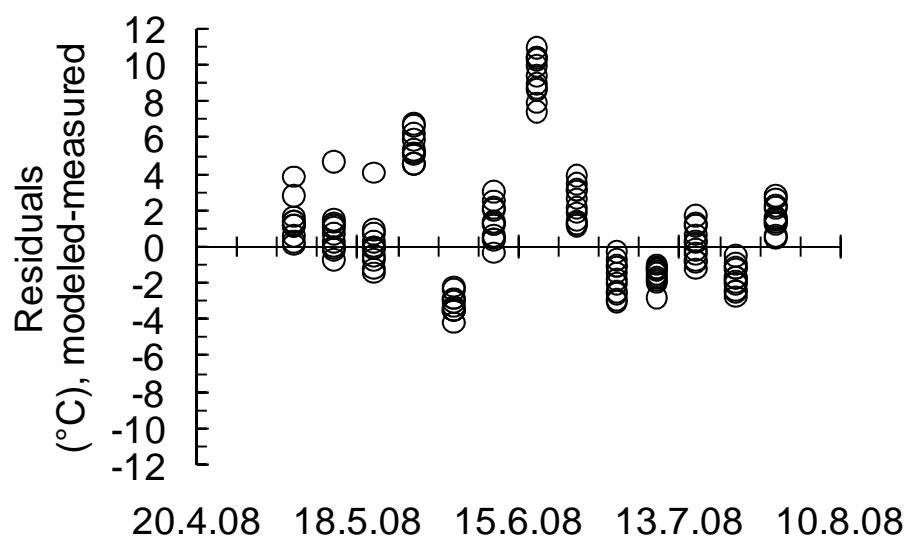


Figura 18. Residui (temperature modellate-temperature misurate) alle varie date.

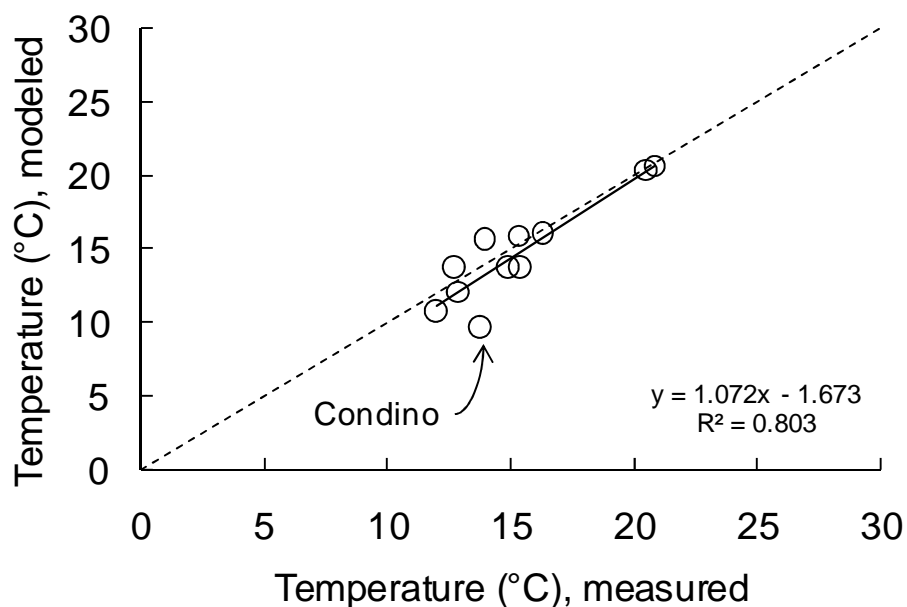


Figura 19. Temperature medie modellate (asse y) in rapporto a quelle medie misurate (asse x) per ciascuno dei vari siti. La linea tratteggiata indica il rapporto 1:1. La linea continua rappresenta la funzione di regressione.

### 3.1.2.3 Sviluppo del modello 2008

La distribuzione dei valori medi di ozono per il periodo considerato (11 settimane) mostra una distribuzione altamente asimmetrica (Figura 20). Anche il test di normalità (Shapiro-Wilk) conferma la generale non normalità nella distribuzione del dato ( $W=0.781$ ,  $p<0.001$ ).

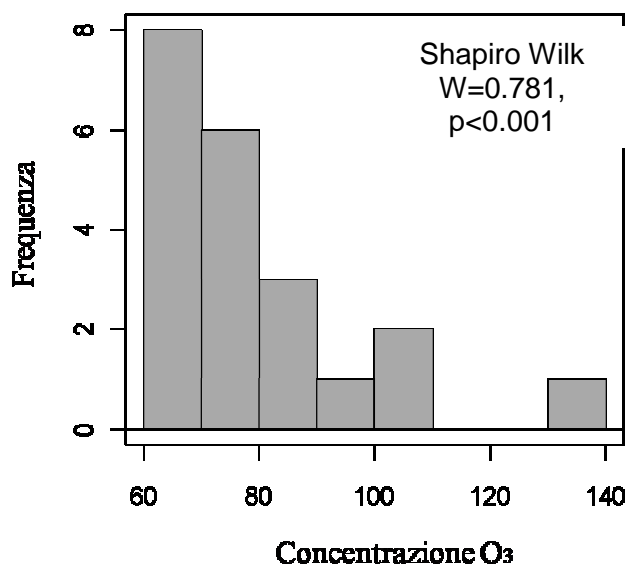


Figura 20: Distribuzione dei valori medi di ozono per l'anno 2008, basati sulle 21 osservazioni disponibili. Nel grafico è riportato il valore dello Shapiro Wilk test.

Data la forte asimmetria nel dato di input, si è utilizzata una trasformazione Box-Cox per normalizzare il dato. Poiché non è stato possibile determinare un valore del parametro  $\lambda$  ottimale per ottenere una distribuzione normale, si è optato per trasformare il dato attraverso una classica trasformazione logaritmica ( $\lambda=0$ , Figura 21) e attraverso una radice quadrata ( $\lambda=0.5$ , Figura 21). In entrambe i casi, comunque, il test di normalità (Shapiro Wilk) è risultato significativo (non viene qui mostrato).

Osservando il fit individuale dei singoli predittori, si è osservato come le temperature e la quota aumentino il valore di massima verosomiglianza del modello, (e presentino in generale un più basso valore di AIC) rispetto all'inclusione delle sole coordinate (Tabella 11). Questo andamento è confermato sia per il dato trasformato via logaritmo che via radice quadra.

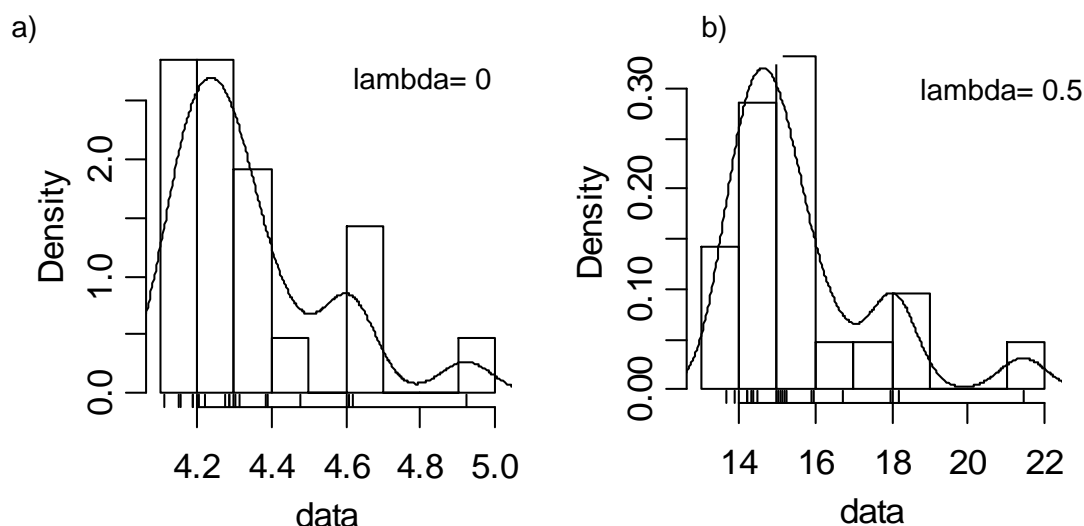


Figura 21. Distribuzione delle concentrazioni medie di Ozono per il 2008 in seguito a a) trasformazione logaritmica ( $\lambda=0$ ) e b) trasformazione radice quadrata ( $\lambda=0.5$ ). In entrambi i casi, il dato non risulta normalizzato.

Tabella 11. Stima della massima verosomiglianza e dell'AIC per i singoli predittori per le due trasformazioni adottate (i valori stimati delle componenti spaziali non vengono mostrati).

Fit Individuali	Likelihood (AIC)	
	lambda=0	lambda=0.5
Coordinate	-84.3 (180.6)	-85.33 (182.7)
Quota	-80.14 (170.3)	-81.5 (170.3)
Temperature	-80.03 (170.1)	-81.3 (170.1)

In seguito alla costruzione di un modello totale a al processo di backward selection dei predittori, si è ottenuto un modello ridotto costituito da quote e temperature, per il set di dati trasformati in entrambi i modi. Ovviamente il modello totale (tutti i predittori inclusi) presenta un valore di verosimiglianza superiore rispetto a quello del modello ridotto. Il valore di AIC, che invece pesa il numero di predittori (e quindi di parametri stimati nel modello), è pressoché paragonabile tra modello ridotto e modello totale, confermando l'adeguatezza del modello parsimonioso (Tabella 12)

Tabella 12. Descrizione sintetica dei modelli spaziale ridotti ottenuti dopo le procedure di selezione dei predittori. Per entrambe le trasformazioni del dato adottate, il modello ridotto mostra uguali parametri e i predittori inclusi nel modello ridotto sono gli stessi (quota e temperature).

Trasformazione	Modello	Intercetta	X	Y	Quota	T(°)	Parametri Spaziali				
							$\sigma^2$	$\Pi$	$\tau^2$	AIC	logL
lambda=0	Totale	30.328	0.00	0.000	0.000	-0.029	0.018	15172	0	169.0	-76.51
lambda=0	<b>Ridotto</b>	<b>4.651</b>			<b>0.000</b>	<b>-0.020</b>	<b>0.041</b>	<b>35230</b>	<b>0</b>	<b>171.7</b>	<b>-79.86</b>
lambda=0.5	Totale	265.990	0.000	0.000	-0.000	-0.345	1.591	15172	0	171.3	-77.66
lambda=0.5	<b>Ridotto</b>	<b>19.814</b>			<b>0.000</b>	<b>-0.243</b>	<b>4.029</b>	<b>41773</b>	<b>0</b>	<b>174.3</b>	<b>-81.14</b>

L'errore totale in cross-validazione per entrambe i modelli mostra per le due trasformazioni del dato utilizzate, valori molto simili, da cui si può concludere una generale corrispondenza e similarità nei due modelli sviluppati (lambda= 0 e 0.5). Inoltre, la distribuzione spaziale dell'errore, in entrambe i modelli, ha esattamente lo stesso segno (Figura 22). Si nota solo che il modello con trasformazione logaritmica produce stime peggiori (negative e positive) in termini assoluti.

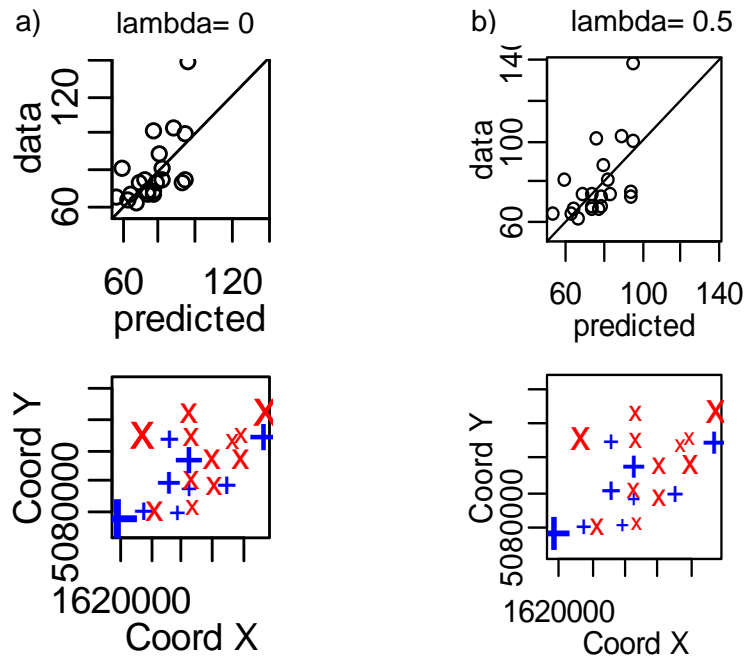


Figura 22. In alto: confronto tra valori predetti dal modello spaziale in seguito a LOO e valori realmente osservati per le concentrazioni trasformate attraverso logaritmo (a,  $\lambda=0$ ) e radice quadrata (b,  $\lambda=0.5$ ). In basso: differenza tra valori osservati e predetti nello spazio (la grandezza delle croci esprime il valore assoluto del discostamento, il blu esprime un errore positivo, il rosso negativo).

#### 3.1.2.4 Sviluppo del modello 2009

La distribuzione del dato medio di concentrazione di Ozono nel 2009 (per le 12 settimane considerate e per i 25 siti considerati) mostra una distribuzione pressoché normale (Statistica W=0.966,  $p=0.556$ ) (Figura 23). Per tale motivo non si richiede nessuna procedura di normalizzazione preventiva e il dato è stato inserito all'interno del modello nella sua forma originale.

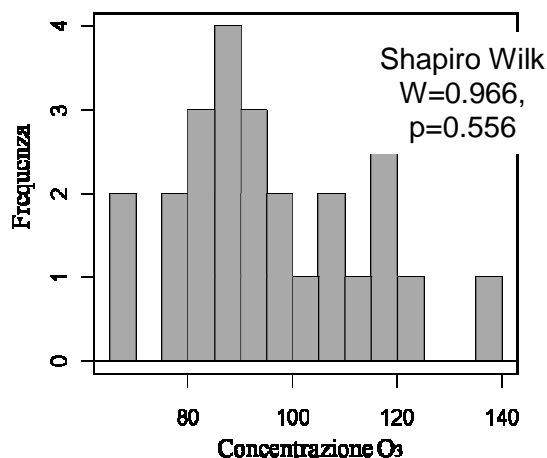


Figura 23: Distribuzione dei valori medi di ozono per l'anno 2009, basati sulle 25 osservazioni disponibili. Nel grafico è riportato il valore dello Shapiro Wilk test per osservare la normalità del dato.

Osservando il valore di verosimiglianza ottenuto per inserendo nel modello separatamente ciascun predittore (coordinate spaziali, temperatura e quota), si è osservato un generale migliore fit con l'inclusione della sola temperatura (è necessario ricordare che le temperature utilizzate in questa fase, costituiscono in alcuni casi la medie di 12 settimane calcolate sul modello trentino delle temperature per il 2008) (Tabella 13).

Tabella 13. Stima della massima verosimiglianza e dell'AIC per i singoli predittori (i valori stimati delle componenti spaziali non vengono mostrati).

<b>Fit Individuali</b>	<b>Likelihood (AIC)</b>
Coordinate	-106.0 (224.0)
Quota	-103.9 (217.9)
Temperature	-101.7 (213.5)

Il risultato del confronto tra modello totale e modello ridotto ottenuto mediante *backward selection* dei predittori e che include temperature e quota (escludendo le coordinate dalla stima dei parametri), mostra comunque un'elevata somiglianza (in termini di AIC e di verosimiglianza) con il modello totale, da cui si determina anche in questo caso la generale adeguatezza del modello parsimonioso (Tabella 14).

Tabella 14. Descrizione sintetica del modello spaziale ridotto ottenuto dopo le procedure di selezione dei predittori. Il modello ridotto include quota e temperatura.

Modello	Intercetta	X	Y	Quota	T(°)	Parametri Spaziali				
						$\sigma^2$	$\Pi$	$\tau^2$	AIC	logL
Totale	1519.128	0.0001	- 0.0003	0.041	2.828	0	0	131.8	209	-96.5
Ridotto	32.962			0.032	1.702	198.70	17685	0	207.4	-97.72

Il valori predetti dal modello in fase di LOO, mostrano una buona corrispondenza tra valori predetti ed osservati, anche se il modello tende a sottostimare i valori osservati molto alti (Figura 24).

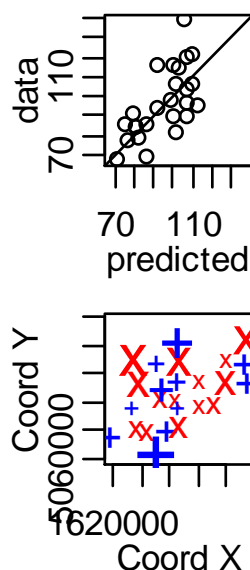


Figura 24: In alto: confronto tra valori predetti dal modello spaziale in seguito a LOO e valori realmente osservati per le concentrazioni di ozono. In basso: differenza tra valori osservati e predetti nello spazio (la grandezza delle croci esprime il valore assoluto del discostamento, il blu esprime un errore positivo, il rosso negativo)

### 3.1.2.5 Risultati complessivi del modello

I risultati della validazione mediante LOO indicano che le previsioni del modello sono in linea con i dati misurati e rientrano quasi sempre nel campo di incertezza (*expanded uncertainty*,  $p=95\%$ ) in tipico dei dosimetri passivi e che varia tra il 32.8% (concentrazioni  $< 10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) ed il 21.2% (concentrazioni  $> 80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) (Figura 25). In quest'ambito, è comunque evidente che il modello sottostima i valori alti.

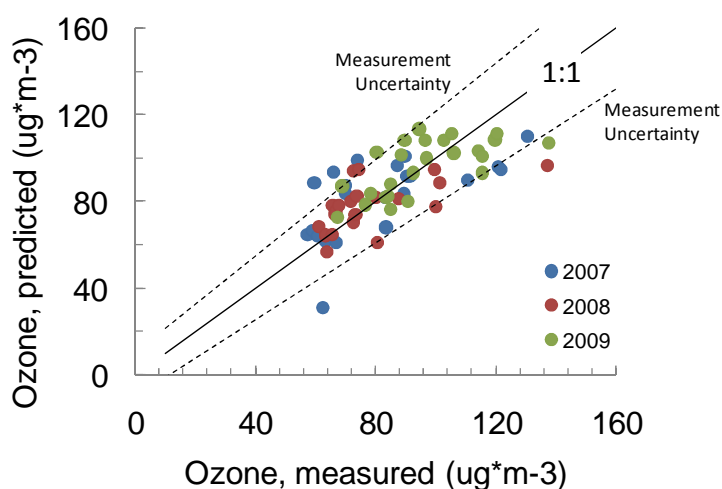


Figura 25. Validazione LOO: concentrazioni di ozono misurato e predetto dai modelli geostatistici utilizzati ai vari anni.



Sulla base di questi risultati, ed utilizzando i dati spazializzati di temperatura ed il modello digitale del terreno, la Figura 26 riporta una stima delle concentrazioni medie di ozono in Trentino ai vari anni. Per il 2009 la mappa ha puro valore dimostrativo in quanto i dati di T utilizzati sono quelli del 2008, non essendo i dati 2009 ancora disponibili.

Dalla Figura 26 si nota il tipico andamento dell'ozono, minore nei fondovalle, ed il beneficio dovuto al completamento della rete, evidente dalla diminuzione delle varianze nel settore occidentale della provincia.

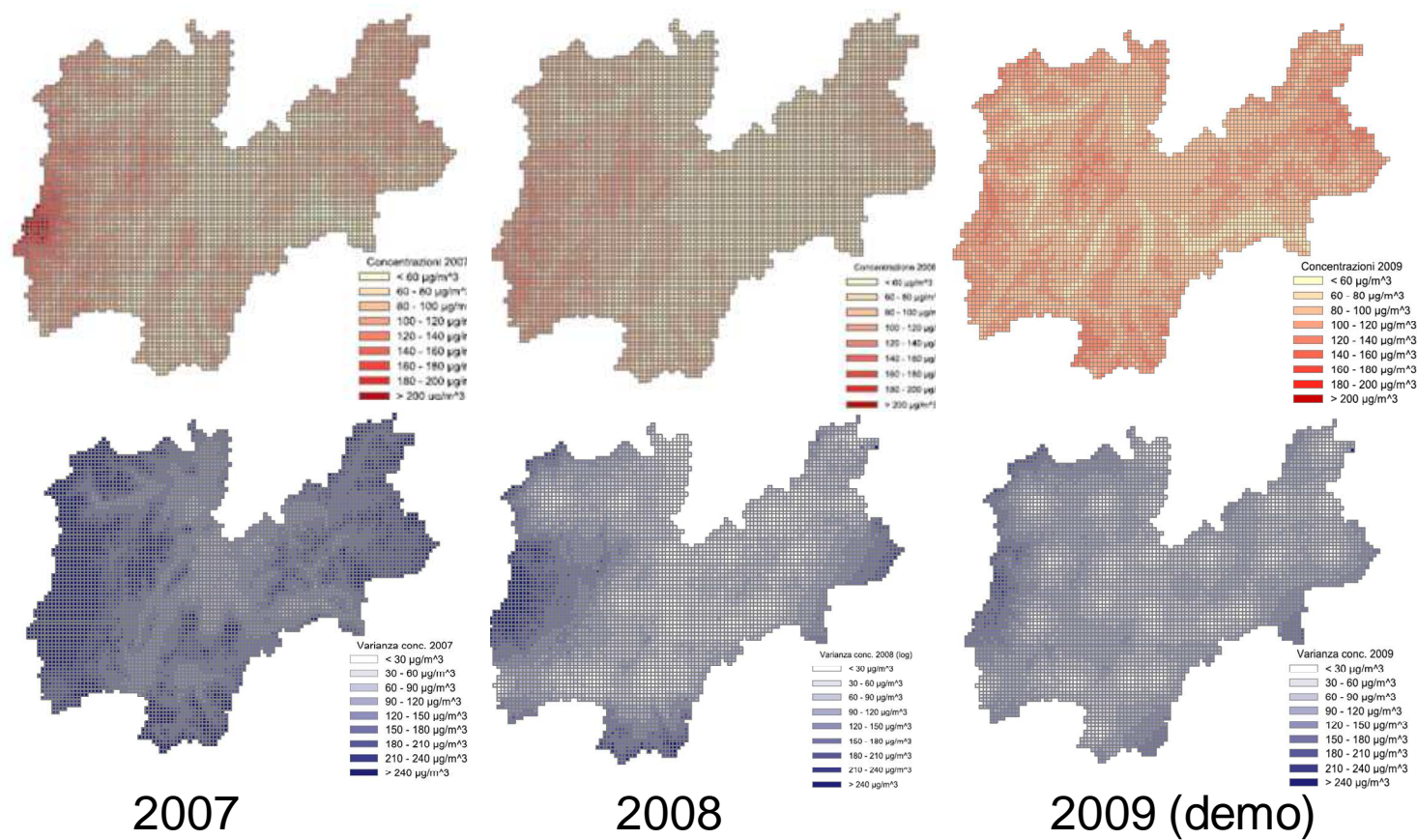


Figura 26. Stima delle concentrazioni medie (in alto) e delle relative varianze (in basso) in Trentino dei vari periodi di misura negli anni 2007, 2008 e 2009. Quest'ultima ha solo valore dimostrativo dato che la spazializzazione è basata sui dati di T del 2008.

### 3.1.3 Rischio potenziale

Le mappe di rischio potenziale sono state preparate utilizzando i dati ozono AOT40 2007 (Gottardini et al., 2009; Bacaro et al., 2008) (Figura 27). Le mappe si riferiscono ad una superficie inferiore a quella CORINE dato che non sono comprese le celle del perimetro esterno della provincia (Tabella 15). Si ricorda che il rischio è appunto definito potenziale in quanto dedotto solo dal superamento di limiti e livelli critici per i quali sperimentazioni in condizioni controllate hanno evidenziato effetti negativi sulla vegetazione (UNECE 2004 e successivi aggiornamenti).

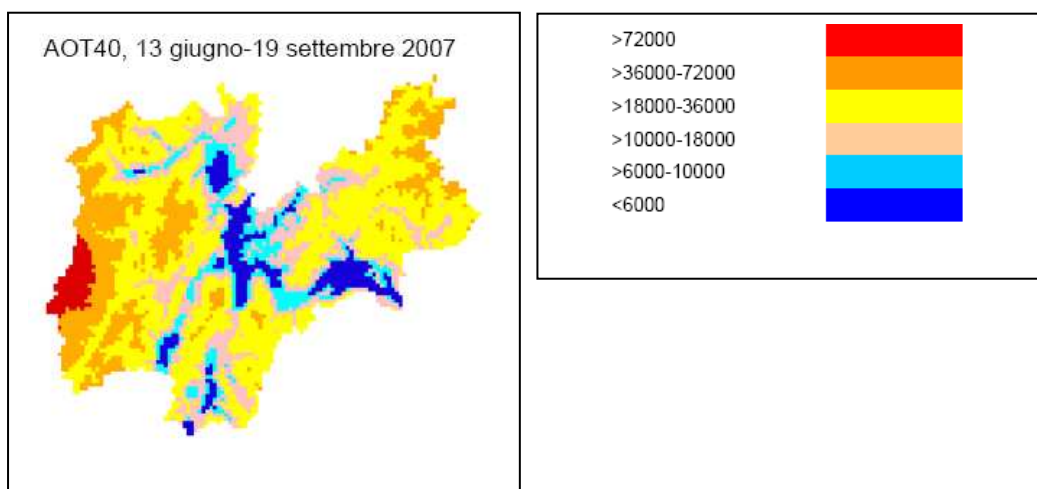


Figura 27. AOT40 (espresso in  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ ) per il 2007. Da Bacaro et al., 2008.

Tabella 15. Superficie della varie classi di uso del suolo secondo CORINE, superfici effettivamente valutate e differenza (in ettari ed in percentuale)

Uso del suolo	Superficie Valutata, ha	Superficie CORINE, ha	Differenza, ha	Differenza, %
Conifere	235704.1	246926.0	11221.9	4.5
Latifoglie	93957.6	98626.0	4668.4	4.7
Abete bianco e abete rosso	161685.1	169917.0	8231.9	4.8
Faggio	46859.0	49777.0	2918.0	5.9
Totale foreste	329661.7	345552.0	15890.3	4.6
Vegetazione	501487.0	528974.0	27487.0	5.2
Vegetazione agraria	68144.9	69822.0	1677.1	2.4

Per ciascuna classe di uso del suolo di Tabella 15 sono state prodotte mappe di rischio secondo i limiti UE e – per le foreste – secondo i limiti UNECE. Questo ultimo è da valutare con particolare attenzione, visto che il periodo di accumulo considerato è circa la metà di quello previsto, ed è quindi da considerarsi una stima conservativa. Ogni mappa riporta le seguenti informazioni:

(i) la categoria di uso del suolo considerata;

(ii) il limite di ozono considerato

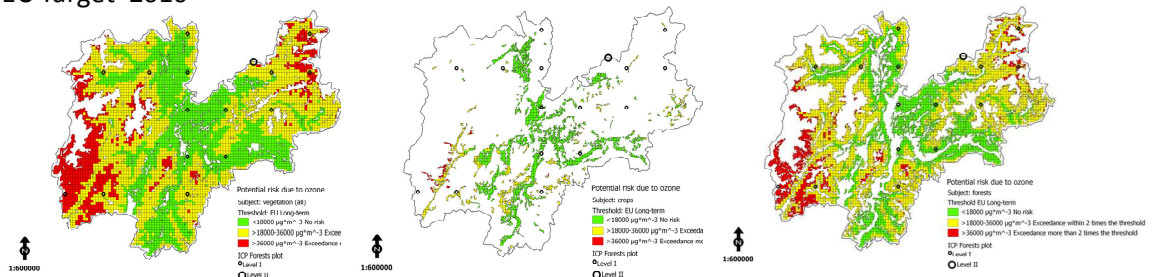
(iii) Per ciascun limite, il rischio potenziale nella forma seguente:

- nessun rischio potenziale, quando i valori di AOT40 sono nei limiti stabiliti (in verde);
- rischio potenziale entro due volte il limite stabilito (in giallo);
- rischio potenziale > di due volte il limite stabilito (in rosso)

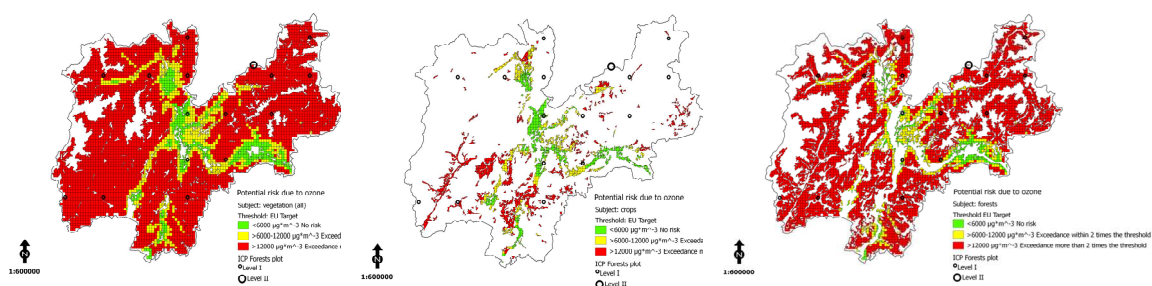
(iv) La dislocazione dei plot forestali di Livello I e II in Trentino.

Le mappe indicano una situazione di frequente rischio potenziale che varia ovviamente in funzione del limite considerato. La Figura 28 riporta le mappe di rischio potenziale per la vegetazione totale, per le coltivazioni e per le foreste secondo i limiti UE.

EU Target 2010



EU Long term 2020



Vegetation (all)

Crops










Forests

Figura 28. Rischio potenziale 2007 secondo i limiti UE per vegetazione, coltivazioni e foreste.

In termini di superficie, la situazione è descritta in Tabella 16. Anche considerando il rischio potenziale desumibile dal superamento di due volte il limite, la superficie di vegetazione a rischio ozono varia dal 15% (limite UE per il 2010) al 81% (limite UE long-term). I dati corrispondenti per le

foreste sono 11-84% e per le coltivazioni 2-47%. La Figura 29 e la Tabella 17 riportano invece la situazione dettagliata per le foreste includendo anche il limite UN/ECE.

*Tabella 16. Vegetazione in Trentino, superfici in classi di rischio potenziale per il 2007 a seconda dei limiti e del tipo di vegetazione considerata.*

AOT40	Threshold	Potential risk	Target	Colour	Vegetation	Forests	Crops
<6000	EU Long-term	No risk	Vegetation		33105	13411	17811
>6000-12000	EU Long-term	Exceedance <-2 times the threshold	Vegetation		63591	39787	18110
>12000	EU Long-term	Exceedance > 2 times the threshold	Vegetation		404792	276463	32224
<10000	UN/ECE	No risk	Forests			35704	
>10000-20000	UN/ECE	Exceedance <-2 times the threshold	Forests			104528	
>20000	UN/ECE	Exceedance > 2 times the threshold	Forests			189430	
<18000	EU Long-term	No risk	Vegetation		181363	114792	49345
>18000-36000	EU Long-term	Exceedance <-2 times the threshold	Vegetation		245097	179771	17267
>36000	EU Long-term	Exceedance > 2 times the threshold	Vegetation		75027	35099	1533

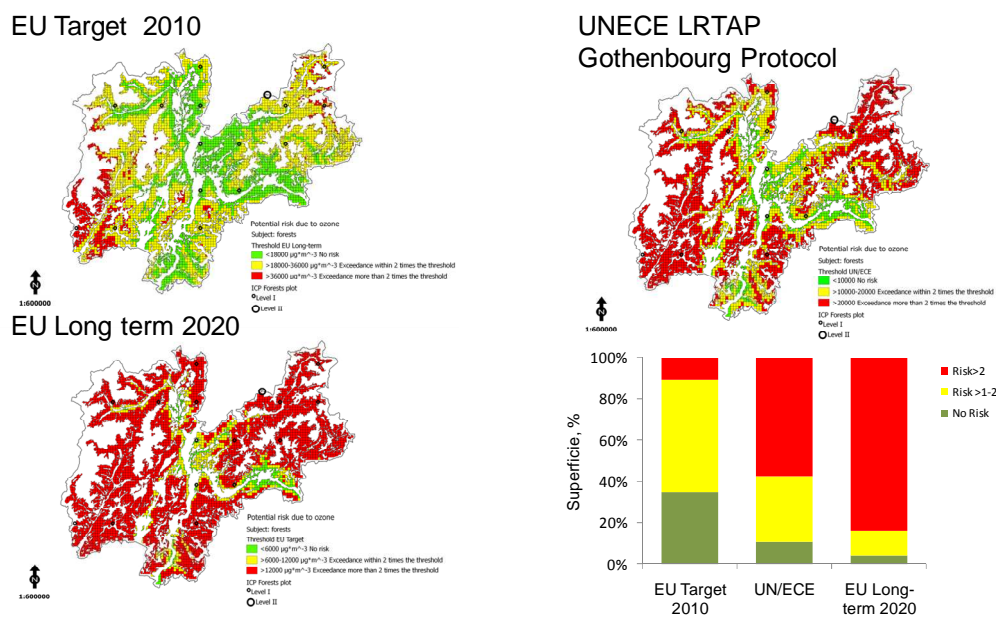


Figura 29. Rischio potenziale 2007 per la vegetazione forestale.

Tabella 17. Vegetazione forestale in Trentino, superfici in classi di rischio potenziale per il 2007 a seconda dei limiti e del tipo di vegetazione forestale considerata.

AOT40	Threshold	Potential risk	Target	Colour	Forests	Conifers	Broadleaves	Spruce/fir	Beech
<6000	EU Target	No risk	Vegetation	Green	13411	5402	1302	1842	179
>6000-12000	EU Target	Exceedance <-2 times the threshold	Vegetation	Yellow	39787	22936	6536	10880	2082
>12000	EU Target	Exceedance > 2 times the threshold	Vegetation	Red	276463	207366	86120	148963	44598
<10000	UN/ECE	No risk	Forests	Green	35704	17216	1302	6595	179
>10000-20000	UN/ECE	Exceedance <-2 times the threshold	Forests	Yellow	104528	70133	35796	48701	15177
>20000	UN/ECE	Exceedance > 2 times the threshold	Forests	Red	189430	148355	56860	106389	31504
<18000	EU Long-term	No risk	Vegetation	Green	114792	68772	29858	41116	11874
>18000-36000	EU Long-term	Exceedance <-2 times the threshold	Vegetation	Yellow	179771	136394	45589	99226	28939
>36000	EU Long-term	Exceedance > 2 times the threshold	Vegetation	Red	35099	30538	18511	21343	6046



Anche considerando solo il rischio potenziale desumibile dal superamento di due volte il limite più conservativo (limite UE per il 2010), la superficie di foreste a rischio ozono varia tra il 13% (conifere) ed il 20% (latifoglie). Sempre secondo questo stesso limite, tra le specie principali e ritenute sensibili all'ozono, i boschi di abete rosso e faggio risultano a rischio per circa il 13% della loro superficie. I dati sono sensibilmente più alti se si considerano i limiti UNECE e UE long-term (Tabella 17; Figura 29).

## 3.2 Sintomi fogliari visibili

### 3.2.1 Osservazioni sui siti forestali di Livello I

Le osservazioni sui sintomi fogliari visibili sono state condotte alla fine di settembre 2009. Complessivamente sono state effettuate 159 valutazioni. Sono state osservate 33 specie legnose distribuite nei 60 miniplot di 2 x 1 m installati presso i 6 siti di Livello I (Figura 30). L'abete rosso è la specie più frequente ed è risultata presente in tutti i 6 siti.

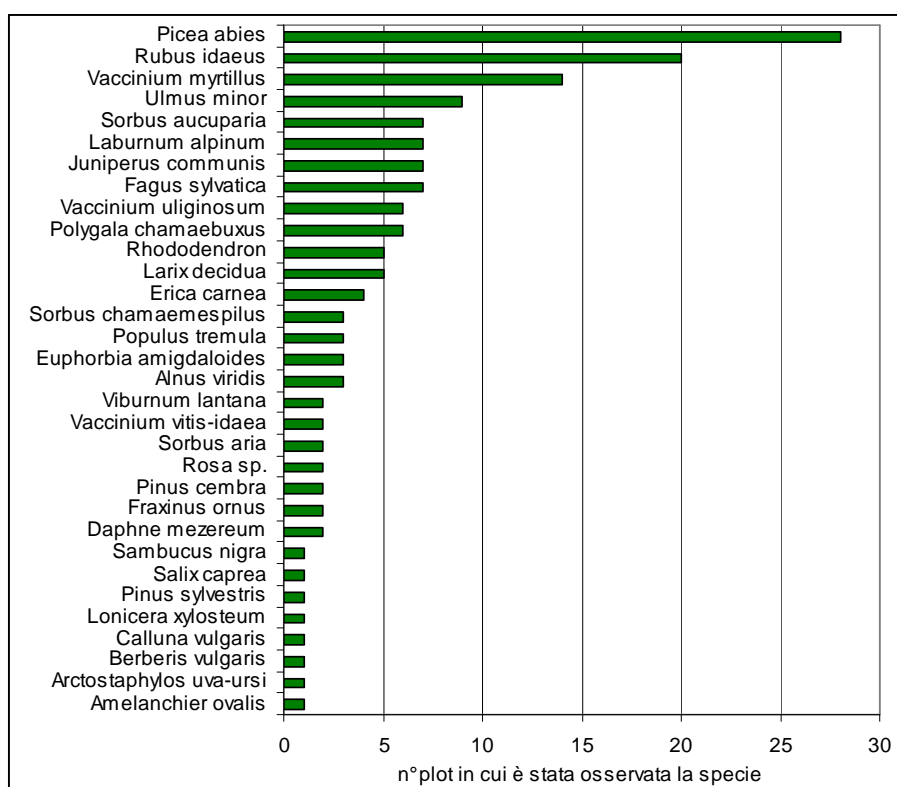


Figura 30. Specie rilevate nei sei siti forestali di Livello I.

Il maggior numero di specie è stato rilevato presso il sito di Concei, seguito da quello di Condino. In Tabella 18 sono riportati la data di osservazione, il numero di specie totali osservate e il numero medio di specie per miniplot per ciascun sito (con l'intervallo di confidenza al 95%).

*Tabella 18. Numero di specie rilevate per sito forestale di Livello I, data di osservazione, ricchezza media di specie per area di saggio e suo intervallo di confidenza.*

<b>Sito</b>	<b>Data rilievo</b>	<b>N°tot specie</b>	<b>N° medio specie/plot</b>	<b>IC 95%</b>
Bedollo	28/9/09	3	1,8	0,86 - 2,74
Castello Tesino	17/9/09	6	2,2	0,85 - 3,55
Tonadico	17/9/09	4	1,2	0,83 - 1,57
Condino	15/9/09	13	4,9	3,34 - 6,46
Concei	15/9/09	19	4,5	3,40 - 5,60
Pejo	2/10/09	5	1,4	0,79 - 2,01

Relativamente ai sintomi rilevati, la Tabella 19 riporta i risultati in termini di incidenza (n. casi positivi in rapporto al totale dei casi) e per tipologia di sintomo osservato per sito. Nei plot esaminati e sulle specie presenti non sono mai stati osservati sintomi attribuibili con certezza all'ozono. Viceversa, sono risultati assai frequenti i sintomi attribuibili ad agenti diversi (funghi, insetti) rilevati in 150 casi.

*Tabella 19. Casi osservati (n) e frequenza dei diversi sintomi per ciascun sito forestale di Livello I rilevato.*

<b>Sito</b>	<b>N°casi</b>	<b>Sintomi assenti</b>	<b>Sintomi da ozono</b>	<b>Altri sintomi</b>	<b>Sintomi combinati</b>
Bedollo	18	0	0	1	0
Castello Tesino	22	0,05	0	0,95	0
Tonadico	12	0	0	1	0
Condino	48	0,10	0	0,90	0
Concei	45	0,04	0	0,96	0
Pejo	14	0,07	0	0,93	0

### 3.2.2 Osservazioni sul sito forestale di Livello II di Passo Lavazé

I rilievi effettuati presso il sito forestale di Livello II di Passo Lavazé hanno interessato 23 miniplot di 2\*1 m, su un margine forestale di 1268 m, stabiliti per ottenere un livello di precisione pari al 20% (vedi metodica ICP Forests, paragrafo 2.2.2). Sono state osservate un totale di 34 specie, tra legnose ed erbacee, con un numero complessivo di valutazioni pari a 168. I dati rilevati presso il sito di Passo Lavazé sono riportati in Tabella 20. Gli unici sintomi rilevati sono risultati quelli attribuibili a cause diverse dall'ozono (gelo, insetti, funghi, ecc.).



Tabella 20. Numero di plot, di specie, ricchezza media di specie e relativo intervallo di confidenza, numero di casi osservati e frequenza dei diversi sintomi nel sito forestale di Livello II di Passo Lavazé.

Sito	N° plot	N° tot specie	N° medio specie/plot	IC 95%	N° casi osserv.	Sintomi assenti	Sintomi da ozono	Altri sintomi	Sintomi combinati
Passo Lavazé	23	34	7,30	5,94 - 8,67	168	0,41	0	0,59	0

### 3.2.3 Osservazioni su Viburno

I sintomi da ozono su piante di *Viburnum lantana* hanno iniziato a comparire ad inizio luglio a Margone ed alla fine di luglio a Lasino (Figura 31). A Margone il numero di piante sintomatiche è continuato ad aumentare fino alla fine del periodo di osservazione (settembre), quando il 90% delle piante risultavano sintomatiche. A Lasino invece gli aumenti di piante sintomatiche si sono registrati solo fino a metà agosto ed i valori massimi raggiunti sono stati decisamente più bassi (30%); in una delle tre aree aperte non è mai stata rilevata la presenza di piante sintomatiche.

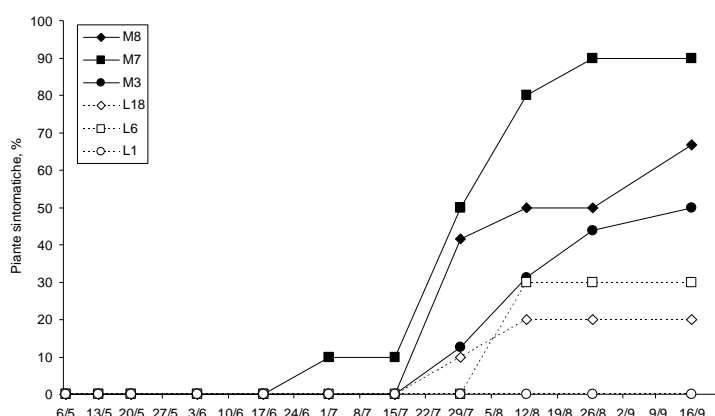


Figura 31. Evoluzione temporale della percentuale di piante sintomatiche nelle sei repliche. I simboli pieni rappresentano le tre aree aperte ad alto ozono (Margone); i simboli vuoti rappresentano le tre aree aperte a basso ozono (Lasino).

Considerando i valori medi di piante sintomatiche percentuali calcolati per Margone e Lasino, e confrontando questi dati con l'andamento temporale dei corrispondenti valori di AOT40 cumulati (Figura 32), si osserva una comparsa di piante sintomatiche (3%) quando i valori di AOT40 hanno raggiunto rispettivamente circa 12000 e 15000 ppb h.

Il valore obiettivo fissato dalla Direttiva N. 50 del 2008 per la protezione della vegetazione (9.000 ppb h) è stato superato tra la seconda metà di giugno (Margone) e l'inizio di luglio (Lasino).

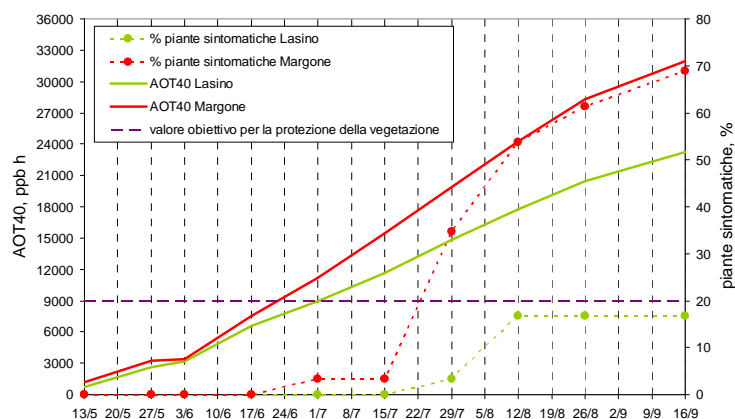


Figura 32. Evoluzione temporale della percentuale media di piante sintomatiche a Lasino e a Margone e dei valori cumulati di AOT40 (medie dei rispettivi valori rilevati nelle tre aree aperte). La linea tratteggiata riporta il valore obbiettivo della Direttiva EU.

Mettendo in relazione i dati percentuali di piante sintomatiche con i corrispondenti valori di AOT40, considerando complessivamente tutti i singoli valori rilevati per sito e per data (Figura 33), si può osservare una buona correlazione tra le due serie di dati; questo risultato porta ad ipotizzare l'esistenza di una relazione dose/risposta, intendendo per “dose” l'AOT40 e per “risposta” la % di piante sintomatiche.

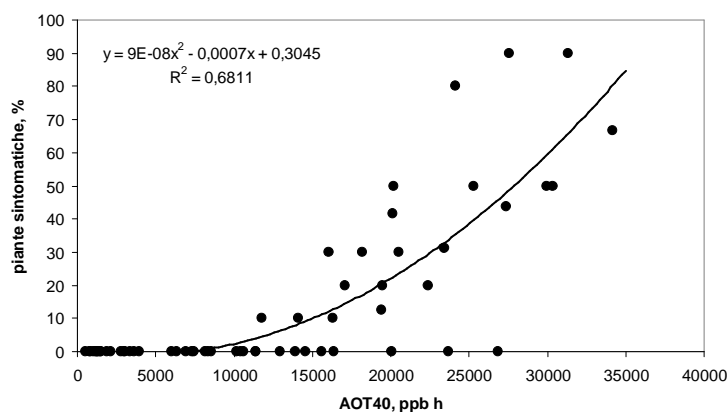


Figura 33. Frequenze (%) di piante sintomatiche (tutti i siti e le date) in relazione con i corrispondenti valori di AOT40.

## 4. Conclusioni

I livelli di ozono registrati nel 2009 confermano il quasi ubiquitario superamento dei livelli di protezione per la vegetazione stabiliti sia dalla UE che dall'UN/ECE. Corrispondentemente, gran parte della superficie vegetata risulta a potenziale rischio ozono.

Considerando anche i dati 2007 e 2008, è evidente una considerevole variabilità a livello di sito e ciò conferma l'importanza di uno studio pluriennale che eviti valutazioni distorte da particolari episodi tipici di singoli anni.

Relativamente ai sintomi, nessuna tra le specie legnose rilevate sui 6 siti ha mostrato sintomi attribuibili all'ozono. Ciò è forse anche da attribuire alle caratteristiche intrinseche, morfologiche e fisiologiche, delle specie rilevate, poche delle quali risultano essere riportate come sintomatiche dai vari report nazionali ed internazionali.

Viceversa, sono risultati frequenti e proporzionali ai livelli di ozono i sintomi su Viburno rilevati durante un'indagine *ad hoc*.

E' importante tuttavia sottolineare che le risposte delle piante all'ozono possono riguardare aspetti diversi dal sintomo fogliare ed in particolare possono consistere in una riduzione del tasso di crescita (e conseguentemente del potenziale immagazzinamento di carbonio), una variazione dei rapporti allometrici, maggiore suscettibilità a parassiti ed agli stress ambientali, ed una diminuzione di vitalità. Questi aspetti verranno presi in considerazioni nello sviluppo dello studio che dovrebbe proseguire nel 2010 e 2011 con l'obiettivo di comprendere i reali effetti dell'ozono sulla vegetazione del Trentino.

## 5. Bibliografia

- Bacaro G., Calderisi M., Cristofolini F., Cristofori A., Gottardini E., Rocchini D., Ferretti M., 2008. Studio di un modello per la stima dell'ozono troposferico in provincia di Trento. Relazione tecnica dello studio realizzato nell'ambito della convenzione tra IASMA e Servizio Foreste e Fauna della Provincia Autonoma di Trento (Convenzione N. 4297 del 12/3/08). 45 pp.
- Box G. E. P., Cox D. R., 1964. An analysis of transformations (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 26: 211-252.
- Burnham K. P., Anderson D. R., 2002. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*. Springer-Verlag.
- Bussotti F., Agati G., Desotgiu R., Matteini P., Tani C., 2005. Ozone foliar symptoms in woody plant species assessed with ultrastructural and fluorescence analysis. *New Phytologist*, 166:941.
- Diggle P. J., Ribeiro J. P. Jr., 2007. *Model-based Geostatistics*. Springer-Verlag.
- Gottardini E., Cristofori A., Cristofolini F., Ferretti M., 2007. Bio-monitoraggio integrato dell'ozono in provincia di Trento. Istituto Agrario di San Michele all'Adige (IASMA). Centro Sperimentale. Relazione dello studio realizzato nell'ambito della convenzione tra APPA Trento e IASMA nel campo della tutela e studio della qualità dell'aria (Det. N. 174/2 del 09.07.2007).
- Gottardini E., Cristofolini F., Cristofori A., Ferretti M., 2009. Ozono troposferico in provincia di Trento: livelli ed effetti sulla vegetazione nel 2008. Relazione tecnica dello studio realizzato nel 2008 nell'ambito delle convenzioni stipulate dalla Fondazione Edmund Mach con il Servizio Foreste e Fauna e con l'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente della Provincia Autonoma di Trento. 35 pp.
- Gunthardt-Goerg M. S. and Vollenweider P., 2007. Linking stress with macroscopic and microscopic leaf response in trees: New diagnostic perspectives. *Environmental Pollution*, 147:467-488.
- Innes J.L., Skelly J.M., Schaub M., 2001. Ozone and broadleaved species. A guide to the identification of ozone-induced foliar injury. *Ozon, Laubholz- und Krautpflanzen. Ein Führer zum Bestimmen von Ozonsymptomen*. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Stuttgart, Wien; Haupt. 136. ISBN 3-258-06384-2.
- Novak K., Schaub M., Fuhrer J., Skelly J. M., Frey B., Krauchi N., 2008. Ozone effects on visible foliar injury and growth of *Fagus sylvatica* and *Viburnum lantana* seedlings grown in monoculture or in mixture. *Environmental and Experimental Botany*, 62:212-220.
- Pawitan Y., 2001. *Statistical Modelling and Inference Using Likelihood*. Oxford University Press, Oxford.
- R Development Core Team, 2010. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Shapiro S.S., Wilk M.B., 1965. An analysis of variance test for normality. *Biometrika* 52: 591-611.

- Skelly J. M., Innes J. L., Snyder K. R., Savage J. E., Hug C., Landolt W., Bleuler P., 1998. Investigations of ozone induced injury in forests of southern Switzerland: Field surveys and open-top chamber experiments. *Chemosphere*, 36:995.
- VanderHeyden D., Skelly J., Innes J., Hug C., Zhang J., Landolt W., Bleuler P., 2001. Ozone exposure thresholds and foliar injury on forest plants in Switzerland. *Environmental Pollution* 111:321-331.
- Vollenweider P., Ottiger M., Gunthardt-Goerg M. S., 2003. Validation of leaf ozone symptoms in natural vegetation using microscopical methods. *Environmental Pollution*, 124:101-118.